

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Desarrollo de un sistema de interrogación basado en la modulación directa de un diodo láser para su uso en una red de sensores de fibra óptica



Grado en Ingeniería
en Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Autor: Asier Pérez González

Directores: Mikel Bravo Acha

Manuel López-Amo Sainz

Pamplona, 12 de Junio de 2020



ÍNDICE

ÍNDICE.....	5
INTRODUCCIÓN.....	8
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA EMISIÓN ESTIMULADA, FIBRA	
ÓPTICA Y OTROS COMPONENTES ÓPTICOS.....	10
1.1. Fundamentos teóricos de la Fibra Óptica.....	10
1.1.1. Propagación de la luz por guías de onda cilíndricas.....	11
1.1.2. Sensores de Fibra Óptica.....	16
1.1.2.1. Redes de difracción de Bragg en fibra.....	17
1.1.2.2. Interferómetro Fabry-Pérot.....	19
1.1.2.3. Sistemas de interrogación de sensores de fibra óptica.....	20
1.2. Fundamentos de la Radiación Estimulada – Láser.....	21
1.2.1. Emisión estimulada.....	21
1.2.2. Láser DFB.....	22
1.3. Componentes Ópticos Pasivos.....	23
1.3.1. Acoplador en fibra.....	23
1.3.2. Circulador.....	25
1.3.3. Espejo óptico.....	26
1.3.4. Atenuador óptico.....	26
1.4. Componentes Ópticos Activos.....	27
1.4.1. Moduladores.....	27
1.4.2. Fotodetectores.....	29
2. DISPOSITIVOS DEL INTERROGADOR Y SUS COMPONENTES	
PRINCIPALES.....	32
2.1. Diseño del Sistema Interrogador.....	32
2.2. Controlador de Corriente y Temperatura para fuentes de luz.....	33
2.2.1. Principio de funcionamiento.....	34

2.2.2.	<i>Caracterización</i>	35
2.2.2.1.	<i>Resultados</i>	35
2.3.	Generador de Funciones y Osciloscopio.....	38
2.4.	Conclusiones.....	39
3.	DESARROLLO DEL SOFTWARE DE CONTROL	41
3.1.	Introducción.....	41
3.2.	<i>Software</i> para el controlador Thorlabs CLD1015.....	41
3.3.	<i>Software</i> de control del dispositivo Analog Discovery 2.....	43
3.4.	Sistema de interrogación básico.....	45
3.4.1.	<i>Introducción</i>	45
3.4.2.	<i>Bucle de búsqueda del sensor mediante el barrido de temperatura</i>	46
3.4.3.	<i>Búsqueda del pico o valle y obtención del corrector de potencia del láser</i>	48
3.4.4.	<i>Bucle de modulación en intensidad</i>	48
3.5.	Interrogador WDM y TDM para redes de sensores de fibra óptica.....	51
3.5.1.	<i>Módulo de conexiones de dispositivos remotos al PC</i>	52
3.5.2.	<i>Módulo de configuración del generador de funciones y el osciloscopio</i>	52
3.5.3.	<i>Bucle del interrogador</i>	53
4.	INTERROGACIÓN DE UNA RED DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA	56
4.1.	Introducción.....	56
4.2.	Caracterización de una cavidad Fabry-Pérot.....	56
4.3.	Interrogación de una red de sensores de fibra óptica.....	58
4.3.1.	<i>Resultados</i>	60
5.	CONCLUSIONES	62
	BIBLIOGRAFÍA	64
ANEXO A	Especificaciones del controlador del diodo láser Thorlabs CLD1015	68
ANEXO B	Caracterización del láser DFB	70

ANEXO C	Especificaciones del dispositivo Analog Discovery 2.....	73
ANEXO D	Códigos del software completos.....	77

INTRODUCCIÓN

Una de las ventajas de los sensores de fibra óptica frente a otros sensores es su elevada capacidad de multiplexación. Existen desarrollos capaces de incluir en un solo cable varios centenares de estos sensores, lo que facilita su instalación y utilización. Además, la multiplexación puede realizarse de manera remota, a centenares de kms de los equipos de interrogación [1]. Aun así, el nivel de utilización de los sensores de fibra óptica sigue por detrás del de otras tecnologías como los sensores eléctricos, debido principalmente a razones económicas. Para reducir esta diferencia entre tecnologías y ampliar el rango de aplicaciones en las que los sensores de fibra óptica son competitivos, se realiza una continua investigación y desarrollo tecnológico en este sector. Esto, junto al aumento de soluciones de fibra óptica para comunicaciones, ha reducido el coste de los dispositivos ópticos. Considerando la madurez de la tecnología y la caída en costes en los dispositivos utilizados en comunicaciones, se presenta un panorama de oportunidades para el desarrollo de nuevas soluciones de sensores de fibra óptica de bajo coste.

Existe un creciente interés en el desarrollo de nuevos sistemas de interrogación de sensores de fibra óptica para que sean suficientemente competitivos en aplicaciones que antes se encontraban fuera del alcance de esta tecnología. Para ello, diferentes grupos de investigación han analizado la capacidad de los diodos láser de modificar su longitud de onda modulando su intensidad, temperatura, presión o campo magnético [2,3]. Con esta característica se pueden desarrollar sistemas de interrogación para diferentes tipos de sensores [4], redes de sensores o sensores remotos [5].

En todo lo anterior se encuentra la motivación y los fundamentos de este Trabajo Final de Grado en el que se desarrolla un sistema interrogador de redes de sensores de fibra óptica basado en la modulación directa de la intensidad de un diodo láser en combinación con el control de la temperatura de este. La modulación directa del láser, junto a un modulador externo que pulsa la luz secuencialmente nos permite aplicar técnicas de multiplexación en división de longitud de onda y en tiempo: WDM y TDM (*Wavelength Division Multiplexing* y *Time Division Multiplexing*) simultáneamente.

También, se ha demostrado el correcto funcionamiento del sistema monitorizando una red remota de sensores FBG (*Fiber Bragg Grating*), sensores interferométricos y espejos en fibra. Este sistema ha demostrado alta capacidad de multiplexación a la vez que mantiene simplicidad, robustez y bajo coste. Para ello, se ha desarrollado un *software* en el lenguaje de programación *Python* para controlar, configurar y monitorizar el sistema de manera sencilla desde un PC. El programa consta de dos partes. Una primera parte utilizada para caracterizar sensores en WDM y una segunda parte para el interrogador de redes de sensores con TDM.

Capítulo 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA FIBRA ÓPTICA, EMISIÓN ESTIMULADA Y OTROS COMPONENTES ÓPTICOS

Este capítulo presenta brevemente algunos de los conceptos básicos necesarios para la comprensión del desarrollo de este trabajo final de grado sobre la propagación de la luz por la fibra óptica, así como el funcionamiento y los principales parámetros de algunos componentes ópticos comunes, tanto activos (moduladores y fotodetectores) como pasivos (acopladores, circuladores, espejos y atenuadores) que se utilizan en el proyecto. También, se detalla el uso y funcionamiento de algunos tipos de sensores de fibra óptica utilizados como los FBGs. Además, se resume el funcionamiento del láser y los fundamentos de la emisión estimulada.

1.1. Fundamentos teóricos de la Fibra Óptica

La fibra óptica es una guía de onda cilíndrica, de muy bajas pérdidas y flexible fabricada típicamente de sílice o plástico y con un diámetro usualmente de 125 μm (similar al de un cabello humano). Su uso en comunicaciones se popularizó debido a las ventajas que tiene respecto a los cables de cobre.

Las principales ventajas de la transmisión por fibra óptica son:

- Mayor ancho de banda.
- Menor atenuación
- Inmunidad a interferencias electromagnéticas.
- Insensibilidad a señales exteriores.
- Poco tamaño y peso.

A pesar de esto, la transmisión por fibra óptica no ha sustituido por completo a las comunicaciones por cable de cobre ya que también tiene algunas desventajas:

- Alta fragilidad.
- Los transmisores y receptores ópticos son más costosos.
- Necesidad de realizar conversiones electro-ópticas.

1.1.1. Propagación de la luz por guías de onda cilíndricas

La propagación de la luz por la fibra se produce, en esencia, por la diferencia en el índice de refracción entre el núcleo y la cubierta de la fibra. La fibra óptica está formada típicamente por un núcleo de sílice dopado rodeado por una cubierta de sílice puro. Esta diferencia en la composición del material es lo que produce que el núcleo tenga mayor índice de refracción que la cubierta. Con esto se consigue que la luz se confine en el núcleo de la fibra. La luz confinada en el interior de la fibra viaja en modos de propagación. Los modos son soluciones a la ecuación de Helmholtz para ondas, que se obtiene al combinar las ecuaciones de Maxwell y las condiciones límite.

Además, el fenómeno del confinamiento de la luz por el índice de refracción de la fibra puede explicarse mediante la *Ley de Snell*, considerando dos medios con índice de refracción n_1 y n_2 (siendo $n = c/v$) respectivamente, la luz que atraviesa los dos medios o se refleja o se refracta. Dado un frente de onda con un ángulo de incidencia θ_1 en el primer medio, tendremos que este frente se transmite al segundo medio con ángulo de refracción θ_2 , el cual se puede obtener con:

$$n_1 \times \text{seno}\theta_1 = n_2 \times \text{seno}\theta_2$$

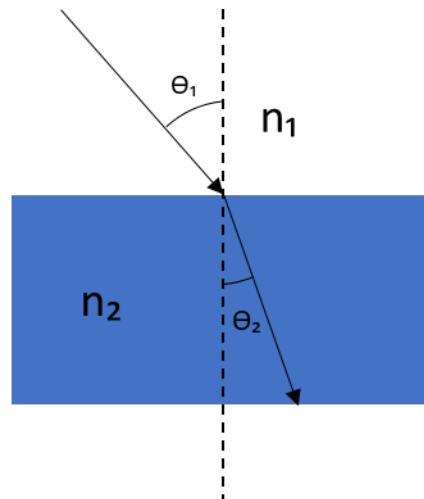


Figura 1.1 - Representación esquemática de la ley de Snell

Por lo tanto, si un haz de luz atraviesa un índice de refracción n_2 menor que el índice de refracción n_1 en el que se encuentra, existe un ángulo en el que se refracta de forma que no atraviesa la superficie entre ambos medios y se refleja hacia el medio original.

Este fenómeno es denominado reflexión total interna (TIR) y es en el que se basa el guiado de luz por la fibra óptica. El ángulo a partir del cual se produce este fenómeno se denomina ángulo crítico y puede obtenerse con la siguiente fórmula:

$$\theta_c = \arcsen\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

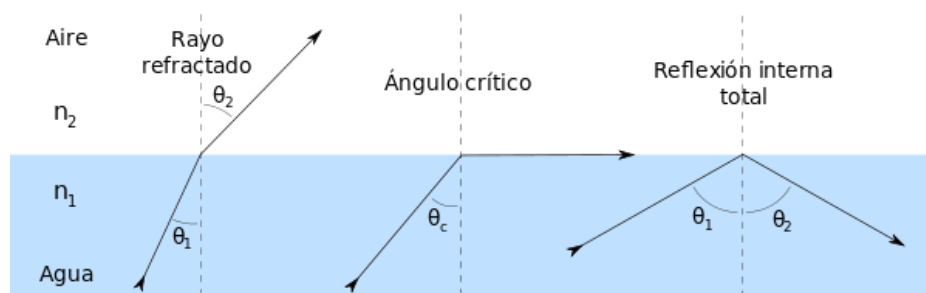


Figura 1.2 - Representación esquemática de la reflexión total interna y el ángulo crítico [6]

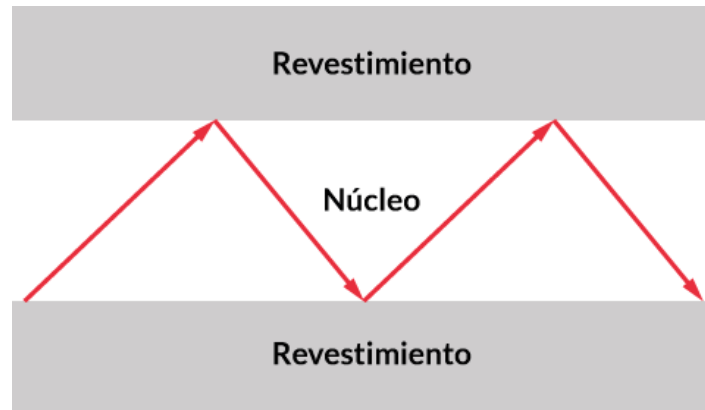


Figura 1.3 - Transmisión de la luz en el interior de una fibra óptica

Aunque todo lo descrito anteriormente podría indicar que toda la potencia del haz de luz introducido en la fibra llega al otro extremo, ya que la luz no sale de la cubierta, la realidad es que hay factores limitantes en las guías de onda ópticas.

Uno de los principales factores es la atenuación, ya que reduce la potencia óptica a lo largo de la longitud de la fibra. La atenuación se representa mediante el coeficiente de atenuación (α) y se expresa en dB/km.

La atenuación es dependiente de la longitud de onda de la luz transmitida. La relación entre la atenuación de la fibra y la longitud de onda transmitida para fibra de sílice monomodo es:

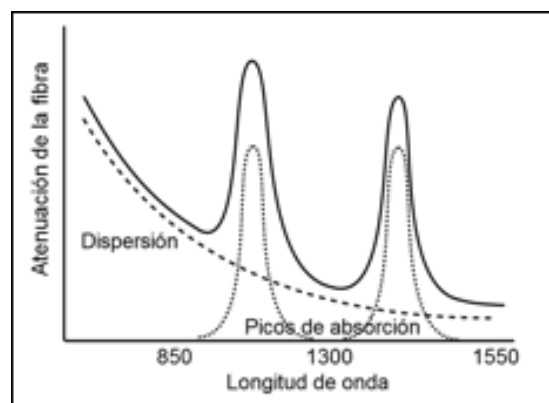


Figura 1.4 - Dependencia de la atenuación con la longitud de onda en una fibra óptica [7]

De manera general, los factores que influyen en la atenuación se pueden agrupar en dos tipos:

- Absorción: Las pérdidas por absorción son debidas al material del que está compuesta la fibra y sus impurezas, que absorben la luz.
- Dispersión espacial o *scattering*: Las pérdidas por dispersión son debidas a las irregularidades del material producidas durante el proceso de fabricación.

La luz en el interior de una fibra óptica puede distribuir en varios modos de propagación según el tipo de fibra. Los modos representan la distribución de los campos eléctricos y magnéticos en el interior de la fibra. Según el número de modos de propagación de la fibra tenemos dos grandes tipos, la fibra monomodo y la fibra multimodo. Los modos también se distinguen por su constante de propagación, que se puede calcular en función del parámetro de fibra V :

$$V = k_0 \alpha \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Donde k_0 es el número de onda, α es el ancho del núcleo y n_1 y n_2 son los índices de refracción del núcleo y de la cubierta respectivamente. Una fibra con un perfil de índice de refracción abrupto y un parámetro V menor que 2.405 es una fibra monomodo, y si es mayor, la fibra guiará otros modos además del fundamental.

La fibra multimodo es aquella que permite la propagación de varios modos simultáneamente. Como cada modo tiene diferente constante de propagación, esto se traduce en una velocidad de propagación diferente. De manera que, si los modos se excitan simultáneamente a la entrada de la fibra, los modos llegan con diferentes retardos a la salida (dispersión intermodal), y para que esta dispersión temporal no afecte a la transmisión de información, estas fibras normalmente se usan para distancias cortas (menores de 2 km). Estas fibras tienen un diámetro de núcleo más grande que las monomodo, lo que permite una mayor capacidad de captación de luz (mayor apertura

numérica), simplifica las conexiones y permite el uso de dispositivos electrónicos de menor coste.

La fibra monomodo, por el contrario, solo permite el guiado de la onda a través del modo fundamental.

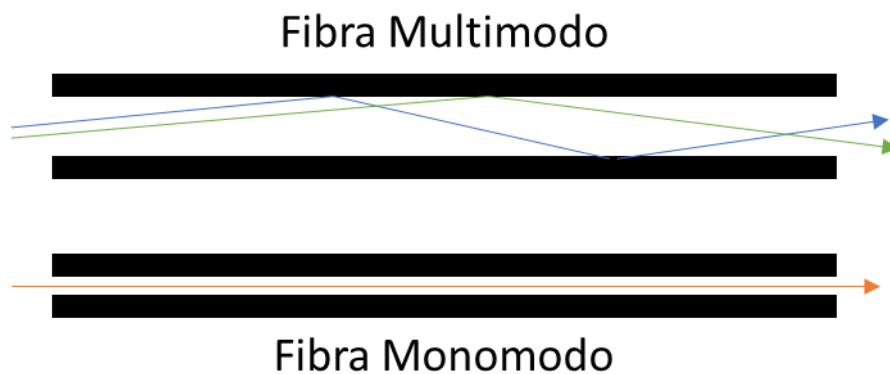


Figura 1.5 – Representación esquemática de la fibra monomodo y multimodo

1.1.2. Sensores de Fibra Óptica

Un sensor de fibra óptica [8] es un dispositivo en el que una señal óptica es modulada en respuesta a un parámetro físico, químico, biológico, etc. De manera que dicho parámetro puede ser interpretado mediante la interrogación de la señal óptica.

Se han desarrollado diferentes tipos de sensores para multitud de aplicaciones. La Tabla 1.1 representa una clasificación de los sensores en función de la magnitud a medir, la distribución espacial de la medida, el mecanismo de transducción y la modulación que induce la medida.

Tabla 1.1 - Tabla de clasificación de los sensores de fibra óptica.

SENSORES DE FIBRA ÓPTICA			
Magnitud a medir	Distribución espacial de la medición	Mecanismo de transducción	Modulación de la luz
Mecánico	Puntual	Intrínseco	Intensidad (amplitud)
Térmico	Distribuida	Extrínseco	Interferométrico (fase)
Electromagnético	Cuasi-distribuida		Polarimétrico (polarización)
Flujo, turbulencia			Espectroscopia (longitud de onda)
Químico			
Radiación			
Biomédico			
Nivel de líquido			

A parte de las ventajas que la fibra óptica nos ofrece, vistas anteriormente, las principales ventajas de los sensores de fibra óptica sobre otros tipos de sensores son las siguientes [9]:

- Eléctricamente pasivos.
- Resistentes a altas temperaturas y a ambientes químicamente reactivos.
- Compactos y ligeros.
- Gran rango dinámico: Permiten monitorizar una amplia variedad de parámetros físicos o químicos.
- Mayor sensibilidad y resolución.
- Aislados eléctricamente.
- Operación remota a varios kilómetros.
- Capacidad de realizar medidas distribuidas
- Alta capacidad de multiplexación.

Debido a todas estas características, durante las últimas décadas se han desarrollado y comercializado una gran variedad de sensores. Algunos de los más importantes se explicarán en siguientes apartados, como por ejemplo las redes de difracción de Bragg en fibra óptica (FBG).

1.1.2.1. Redes de difracción de Bragg en fibra óptica

Las redes de difracción de Bragg en fibra óptica (FBG) consisten en una perturbación periódica del índice de refracción a lo largo del núcleo de la fibra que se produce exponiendo el núcleo a un patrón de interferencia óptica. Esta perturbación actúa como un filtro rechazo banda estrecha [10], ya que permite pasar las longitudes de onda que no resuenan con la red de difracción y refleja las que sí. La longitud de onda de *Bragg* es sensible a cambios de temperatura, presión o tensión entre otros.

La figura 3 muestra el principio de operación de un FBG. La siguiente ecuación representa el valor de la longitud de onda de resonancia de una estructura *Bragg*:

$$\lambda_{Bragg} = n_{eff} \times \Lambda$$

Donde n_{eff} representa el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra y Λ es el periodo del índice de modulación refractiva. Así que, cuando la luz incidente es igual a λ_{Bragg} , una cantidad de luz proporcional a la reflectividad de la estructura es reflejada y el resto es transmitida.

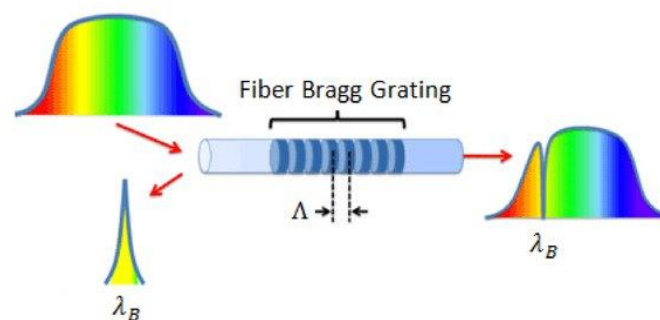


Figura 1.6 - Estructura y funcionamiento de un FBG [11]

La deformación de un FBG afecta directamente a su respuesta a través de la expansión y compresión del tamaño de Λ (grating pitch) y a través del efecto deformación-óptica, es decir, la deformación introduce modificaciones en el índice de refracción efectivo

debido a los efectos foto-elásticos. Las variaciones de longitud de onda relativas, $\Delta\lambda_{Bragg}$, para una deformación longitudinal $\Delta\varepsilon$ aplicada viene dada por la fórmula:

$$\Delta\lambda_{Bragg} = \lambda_{Bragg}(1 - \rho_\alpha)\Delta\varepsilon$$

Donde ρ_α representa el coeficiente foto-elástico de la fibra:

$$\rho_\alpha = \frac{n^2}{2}[\rho_{12} - \nu(\rho_{11} + \rho_{12})]$$

Donde ρ_{11} y ρ_{12} son las componentes del tensor de deformación de la fibra óptica y ν es el coeficiente de *Poisson*. Los valores típicos para una fibra óptica estándar son $\rho_{11} = 0.113$, $\rho_{12} = 0.252$, $\nu = 0.16$ y $n = 1.482$. La respuesta de la deformación medida a temperatura constante viene determinada por:

$$\frac{1}{\lambda_{Bragg}} \times \frac{\Delta\lambda_{Bragg}}{\Delta\varepsilon} = 0.78 \times 10^{-6} \mu\varepsilon^{-1}$$

Medida en $\mu\varepsilon^{-1}$ donde $\mu\varepsilon$ es la deformación correspondiente a $\frac{1 \mu m}{m}$

Por otro lado, la sensibilidad térmica de un FBG ocurre principalmente debido a la variación del índice de refracción efectiva termoinducida. El cambio en longitud de onda para una variación de temperatura ΔT tiene la siguiente formula:

$$\Delta\lambda_{Bragg} = \lambda_{Bragg}(\alpha + \xi)\Delta T$$

Donde α es el coeficiente de expansión térmica y ξ representa el coeficiente termo-óptico. Finalmente, la responsividad térmica normalizada considerando una tensión de fibra constante es:

$$\frac{1}{\lambda_{Bragg}} \times \frac{\Delta\lambda_{Bragg}}{\Delta T} = 6.67 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

1.1.2.2. Interferómetro Fabry-Pérot

Un interferómetro Fabry-Pérot es una cavidad óptica formada por dos superficies reflectantes paralelas. Su espectro de transmisión se caracteriza por líneas resonantes de gran transmisión que se corresponden con las longitudes de onda de resonancia proporcionales al tamaño de la cavidad. Los interferómetros Fabry-Pérot han sido utilizados como sensores de temperatura, vibración y desplazamiento entre otras aplicaciones [12].

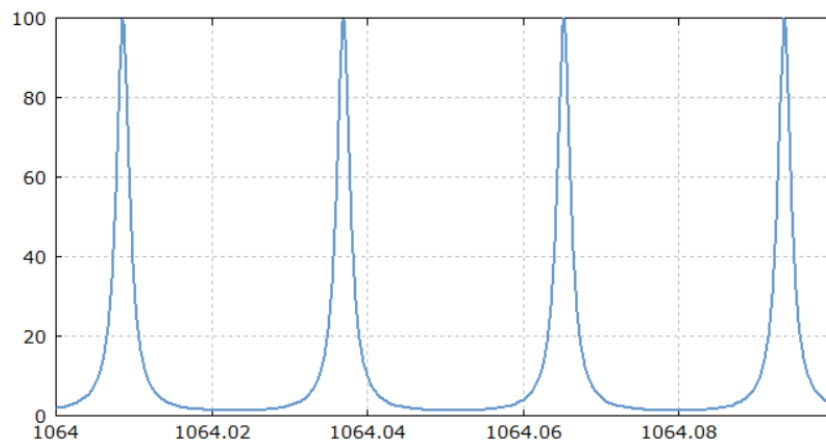


Figura 1.7 – Representación del espectro de un Fabry-Pérot [13]

Esta forma del espectro se debe a las sucesivas reflexiones de luz entre las superficies reflectantes. Cuando los dos haces están en fase, se da interferencia constructiva y, cuando están en fuera de fase, se da interferencia destructiva. El hecho de que los dos haces se encuentre en fase o no depende de la longitud de onda de la luz, del ángulo con el que la luz atraviesa la cavidad, del tamaño de la cavidad y del índice de refracción del material. La diferencia de fases entre los haces transmitidos está dada por:

$$\delta = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) 2 n l \cos\theta$$

1.1.2.3. Sistemas de interrogación de sensores de fibra óptica

Los métodos de interrogación de sensores de fibra óptica están orientados a convertir las variaciones en longitud de onda en señales eléctricas con las características adecuadas que permitan obtener información a partir de la medición realizada [14]. Un sistema de interrogación de sensores de fibra óptica incluye una fuente de luz, un elemento sensor que responde a variaciones de su entorno como temperatura, presión, etc. y un conversor electroóptico como un fotodetector que convierte la señal óptica en una señal eléctrica.

Hay diferentes técnicas de interrogación de sensores dependiendo del tipo de aplicación, el rango a medir, la precisión y la sensibilidad requeridas. El número de sensores a interrogar y el coste del equipo. La tabla 1.2 muestra un resumen de los tipos de interrogación para sensores FBG.

Tabla 1.2 – Técnicas de interrogación de sensores FBG

Métodos de interrogación	Tecnología
Métodos de detección pasiva	Dispositivo de dependencia lineal en longitud de onda
	Espectrómetro CCD
Métodos de detección activa	Detección en potencia
	Filtro Fabry-Pérot
	Par de FBGs igualados
	Espectrómetro transformada de Fourier
	Filtro Fabry-Pérot
	Filtro acústico-óptico ajustable
	Interferómetro Mach-Zender no balanceado
Otros métodos	Interferómetro de par LPG
	Modulación frecuencial
	Correlador óptico CDMA
	Fuente de luz sintonizable

1.2. Fundamentos de la radiación estimulada – Láser

1.2.1. Emisión estimulada

La emisión estimulada es el proceso en el que un fotón fuerza una transición atómica de un electrón desde un estado alterado emitiendo un segundo fotón con las mismas propiedades de fase, energía, polarización y dirección que el primero. Gracias a este proceso puede generarse un conjunto de fotones al pasar por un medio excitado en el que se ha invertido su población, creando luz coherente.

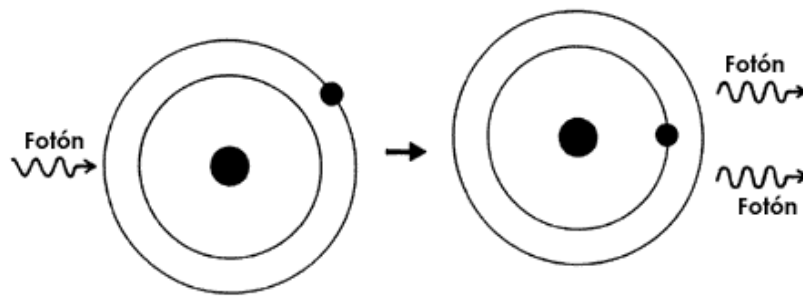


Figura 1.8 – Representación de la emisión estimulada [15]

La condición para que se efectúe la acción de un láser consiste en conseguir una inversión de población suficiente en los átomos. Los electrones normalmente residen en el estado de energía más bajo, pero pueden elevarse a estados de energía más altos excitados por absorción. Cuando se tiene un número suficiente de electrones excitados y un estímulo (fotón) que incide en ellos, los electrones emiten fotones con la misma fase entre ellos, es decir, se produce luz coherente.

Las ondas electromagnéticas coherentes sólo pueden generarse en el rango óptico mediante el principio de emisión estimulada [16]. Los láseres, que pueden fabricarse con fibra óptica, se basan en este efecto. Un láser de fibra óptica básico requiere dos elementos clave. Un material con ganancia que amplifique y una cavidad óptica que atrape la luz en su interior creando una realimentación positiva. Así, la ganancia total de

la amplificación debe superar las pérdidas de la cavidad para conseguir la condición de láser. Dependiendo del medio, se pueden obtener diferentes tipos de láser. Por ejemplo, uno de los medios de ganancia más comunes para la creación de láseres de fibra es la fibra dopada con erbio.

Para controlar la longitud de onda de la emisión de un láser de fibra, se suelen colocar diferentes tipos de filtros en las cavidades del láser. Los FBG, ya comentados en el apartado 1.1.2 como sensores, son los filtros más comunes debido a sus características como reflectores selectivos en longitud de onda. Sirven como espejo y como filtro de banda estrecha. También se pueden utilizar otros tipos de filtro como los basados en cavidades Fabry-Pérot. Los láseres de fibra, en comparación con los demás tipos de láser, son más simples, fiables y pueden ser bombeados con diodos. Además, tienen un espectro más limpio y algunos pueden ser modulados sin distorsión de la señal.

1.2.2. Láser DFB

Un láser DFB (*Distributed-Feedback*) es un láser de semiconductor en el que su cavidad consiste en una estructura periódica que actúa como reflector distribuido en el rango de acción de longitud de onda del láser. El dispositivo tiene varios modos de resonancia, pero típicamente hay uno que sale favorecido [17]. Los DFB son muy estables y se utilizan habitualmente cuando se necesita una radiación altamente coherente y una línea de emisión monomodo estrecha.

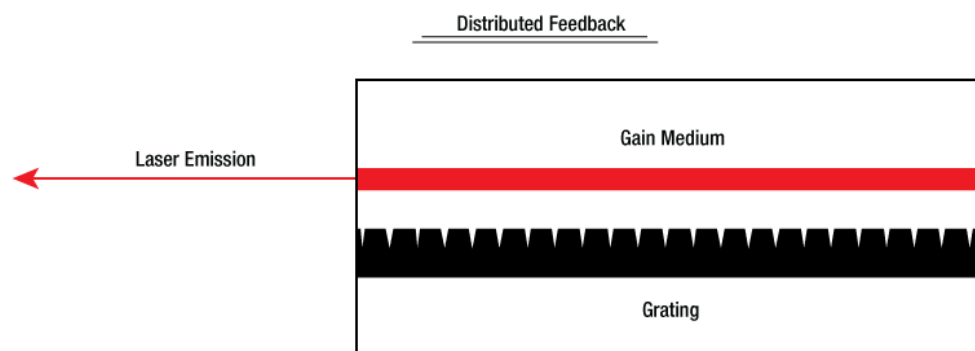


Figura 1.9 – Dibujo esquemático de la estructura de un DFB [18]

En un láser DFB, la reflexión es continua a lo largo de toda la cavidad, en lugar de ocurrir en los dos extremos. Esto cambia el comportamiento de los modos y hace el láser más estable. La modulación de un láser se puede realizar modulando directamente la corriente inyectada o se puede utilizar un modulador externo (apartado 1.4.1). Una de las desventajas de la modulación directa en intensidad es que se produce cambios en la frecuencia óptica, además de los cambios de intensidad. Este fenómeno es llamado *chirp*, y es una de las principales causas de la degradación de la señal con la distancia, limitando el ancho de banda y el rango de la señal.

El *chirp* es el cambio de la longitud de onda de operación de un láser, causado por la modulación directa del mismo. Cuando se realiza una modulación directa de la intensidad de un láser de semiconductor, se modula a su vez la densidad de portadores de carga en la región activa del láser semiconductor, esto afecta al índice de refracción de esta región, lo que a su vez provoca la variación de la frecuencia central del láser.

1.3. Componentes Ópticos Pasivos

1.3.1. Acoplador en fibra

Los sistemas de comunicaciones ópticas precisan de elementos capaces de transferir energía de una o varias fibras a otra o varias otras. Esta función puede ser llevada por acopladores.

Un acoplador es un dispositivo pasivo que se encarga de distribuir la energía procedente de M guías de onda de entrada a N guías de onda de salida. Los acopladores en fibra pueden ser de fibra monomodo o de fibra multimodo, de fibra estándar o fibras especiales (mantenedoras de polarización...) según la naturaleza de las guías que se pretendan utilizar.

Se han desarrollado dos tipos de acopladores: los basados en óptica integrada y los de fibra óptica. Los principios de funcionamiento son similares en ambos casos, pero este apartado se centrará en los de fibra óptica, ya que son más relevantes para el desarrollo del proyecto.

Cuando dos núcleos de fibra se aproximan lo suficiente, sus campos modales se solapan, de manera que los modos de las dos fibras se acoplan y la potencia puede ser transferida entre ellas. Si la constante de propagación de las dos fibras es igual, se puede producir transferencia total de potencia entre ellas.

Uno de los acopladores más utilizado en sistemas de comunicaciones ópticas es el acoplador direccional 2x2. Basándose en la Figura 1.8, se tiene que la potencia de entrada es P_{in} , la potencia transmitida es P_2 , la potencia acoplada es P_3 , la potencia reflejada es P_4 y la potencia reflejada de retorno es P_1 .

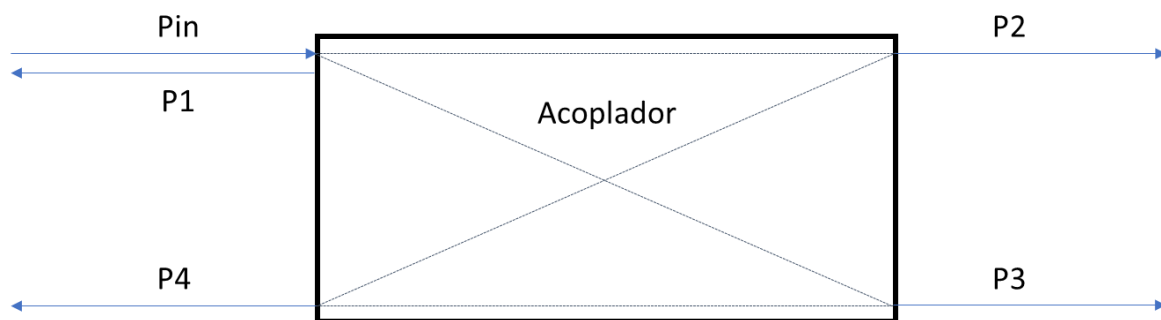


Figura 1.10 – Esquema de un acoplador 2x2

El parámetro de más importancia en un acoplador es la relación de acoplo (*coupling ratio*), el cual indica la división de potencia óptica entre los puertos de salida, y sigue la siguiente ecuación:

$$k = \frac{P_3}{P_2 + P_3}$$

Además, la relación de acoplo depende de la longitud de onda, por lo que las características del acoplador pueden variar con la frecuencia de la señal de entrada.

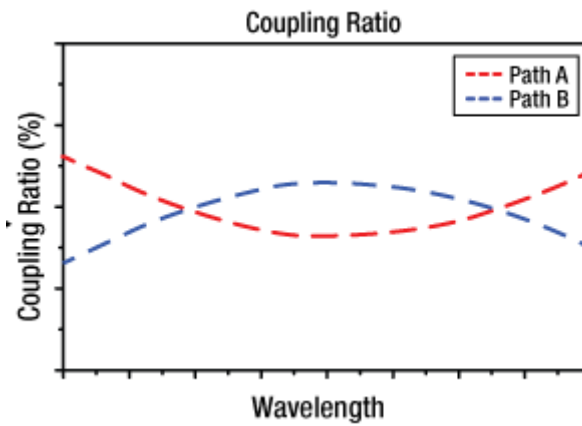


Figura 1.11 – Variación de la relación de acoplo con la longitud de onda [19]

1.3.2. Circulador

Un circulador es un componente de fibra óptica diseñado de manera que la luz entrante por un puerto sale por el siguiente. Es decir, la luz entrante por el puerto 1 sale por el puerto 2, pero la luz reflejada en el puerto 2 no vuelve al puerto 1, sino que sale por el puerto 3. Esto es muy útil cuando se quiere separar señales ópticas que viajan en sentidos opuestos dentro de una fibra óptica.

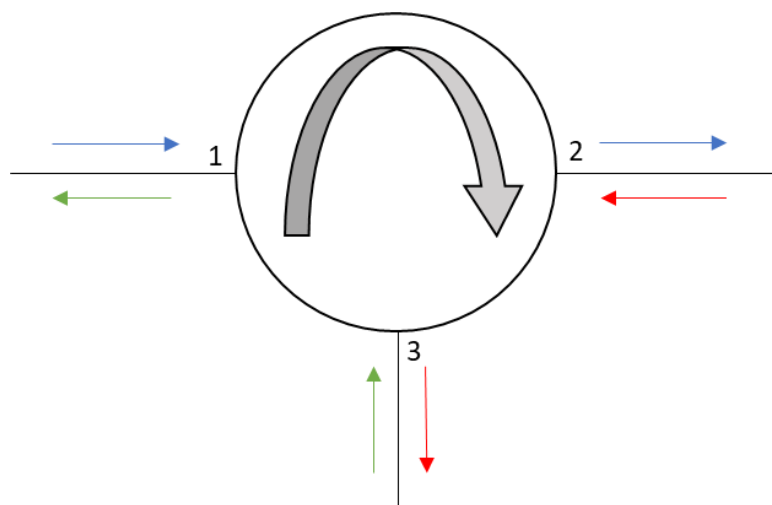


Figura 1.12 – Esquema de un circulador óptico de tres puertos

Las fórmulas que describen el aislamiento entre puertos y las pérdidas de inserción son las siguientes:

$$Aislamiento = 10 \log \frac{P_2}{P_1}$$

$$IL = 10 \log \frac{P_1}{P_2}$$

1.3.3. Espejo óptico

Un espejo es una estructura sencilla formada por un segmento de fibra óptica con un reflector en el extremo. Este reflector tiene muy bajas pérdidas y una respuesta plana para todas las longitudes de onda, lo que hace este dispositivo muy útil cuando se desea una reflexión total de la señal entrante al espejo.



Figura 1.13 – Representación del funcionamiento de un espejo

Otras formas de hacer que la luz entrante vuelva por el mismo camino consiste en el uso de acopladores o circuladores. Con un acoplador se pueden juntar las salidas, por lo que todo lo que entre volverá por las entradas del acoplador, y con un circulador, si se juntan dos patas se consigue el mismo efecto, ya que la entrada conecta con las dos patas unidas y vuelve a la entrada en dirección contraria. En este proyecto se usaron láminas de plata como reflectores, de esta forma la luz incidente se refleja directamente en la fibra.

1.3.4. Atenuador óptico

Un atenuador óptico es un dispositivo utilizado para reducir la potencia de una señal óptica. Son usados en comunicaciones ópticas para igualar la potencia a los niveles requeridos por los receptores.

El funcionamiento típico de un atenuador consiste en la absorción o radiación de la luz en un rango de longitud de onda fijo, evitando reflexiones. Hay dos tipos principales de atenuador; los fijos, que atenúan una cantidad fija de potencia, y los variables, en los que se puede variar la cantidad de potencia a atenuar.

1.4. Componentes Ópticos Activos

1.4.1. Moduladores

Hay dos tipos principales de modulación, frecuentemente la manera más sencilla de modular la intensidad de la luz es modular la intensidad de la corriente de emisión de la propia fuente de luz, esto es conocido como modulación directa. Por el contrario, la modulación realizada con un modulador de luz se conoce como modulación externa, y es necesaria cuando se requieren pulsos estrechos, ya que la modulación directa puede producir efectos de *chirp* indeseados.

La modulación directa en un diodo láser consiste simplemente en utilizar la señal moduladora en la corriente del láser. Este método es simple, pero sufre de efectos no lineales, especialmente a altas frecuencias de modulación. Algunas limitaciones de la modulación directa son:

- Retardo
- Saturación y distorsión
- *Chirp*
- Ancho de banda

La modulación externa se caracteriza en que la generación de la luz y la modulación de esta están separadas. Este sistema ofrece mejor rendimiento a altas frecuencias, pero es más complejo y caro. Un modulador óptico es un dispositivo que se utiliza para modular un haz de luz, ya sea este transmitido en el espacio libre o propagado por una guía de ondas óptica. Los moduladores se pueden categorizar en varios tipos

dependiendo del tipo de parámetro que manipulan, los hay de fase, amplitud, polarización, etc. El modulador externo más utilizado es el de Mach-Zehnder [20].

En este dispositivo la luz entrante se divide en dos ramas, una de las cuales tiene un índice de refracción variable cuando se le aplica un voltaje externo. En ausencia de voltaje, las dos ramas del interferómetro experimentan el mismo cambio de fase, por lo que a la salida tendrán interferencia constructiva. En cambio, si se aplica voltaje a la rama, la interferencia constructiva no ocurre, ya que esta rama tendrá un cambio de fase adicional, lo que reducirá la intensidad transmitida a la salida del interferómetro. De hecho, ninguna cantidad de luz se transmite si la diferencia de fase entre las dos ramas es π .

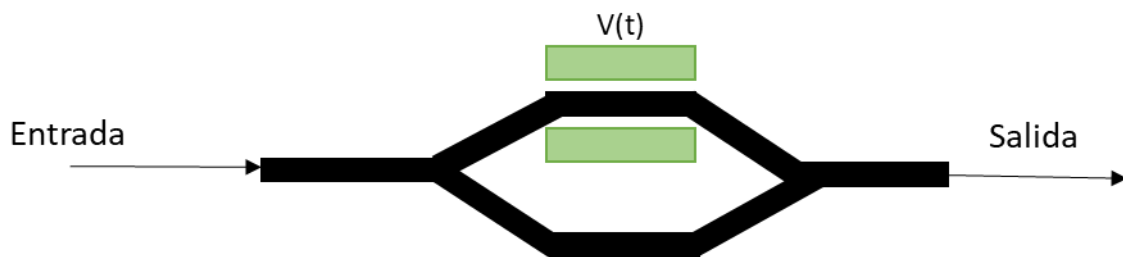


Figura 1.14 – Imagen esquemática de un interferómetro Mach-Zehnder.

1.4.2. Fotodetectores

Un fotodetector es un dispositivo que responde con una señal eléctrica al estímulo de una señal luminosa. El mecanismo fundamental en el proceso de fotodetección es la absorción óptica. En un semiconductor, si la energía incidente de los fotones excede la energía de la banda prohibida, se genera un par electrón-hueco cada vez que un fotón es absorbido por el semiconductor. Si hay un campo eléctrico producido por un voltaje, los electrones y los huecos son barridos por el semiconductor, dando lugar a un flujo de corriente eléctrica. La corriente generada es directamente proporcional a la potencia óptica incidente siguiendo la ecuación siguiente:

$$I_p = RP_{in}$$

Donde R es la responsividad del fotodetector:

$$R = \frac{\eta \lambda}{1.24}$$

Y η es la llamada *eficiencia cuántica* y se define:

$$\eta = \frac{I_p/q}{P_{in}/h\nu}$$

Por lo que se puede observar que la responsividad de un fotodetector aumenta con la longitud de onda, ya que el número de fotones es mayor en la misma potencia óptica, aunque esta dependencia lineal no continua a altas frecuencias, ya que la energía del fotón se vuelve demasiado pequeña para generar electrones.

El método más común de realizar un receptor óptico es mediante la unión p-n con polarización inversa. Esta se basa en una región llamada región de agotamiento, que está libre de portadores de carga libres, y donde un campo eléctrico se opone al flujo de electrones n a p y de huecos de p a n. Cuando la unión p-n se ilumina en uno de los lados, se crean pares electrón-hueco. Debido al campo eléctrico, electrones y huecos generados en la zona de agotamiento aceleran en direcciones opuestas y van a las zonas n y p respectivamente. El flujo resultante de corriente es proporcional a la potencia óptica incidente. Así, una unión p-n con polarización inversa actúa como fotodetector y es conocido como fotodiodo p-n.

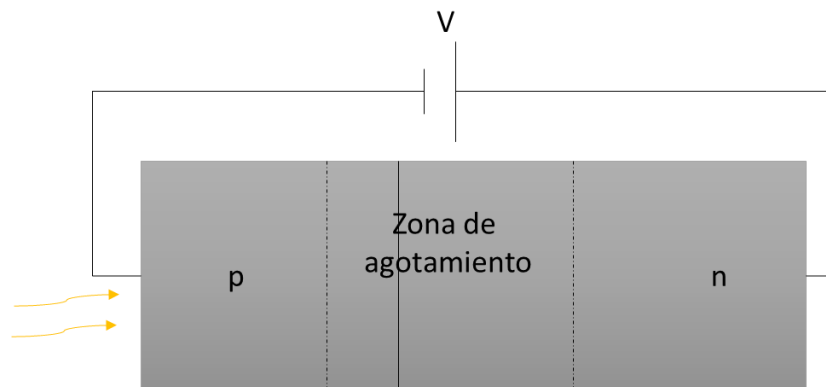


Figura 1.15 – Dibujo esquemático de un fotodiodo p-n con polarización inversa

El mayor factor limitante de este tipo de fotodiodos es la difusión, ya que los electrones generados en la zona p deben difundirse por la frontera con la zona de agotamiento antes de poder pasar a la zona n, lo mismo ocurre con los huecos en la zona n. Este es un proceso lento que puede producir distorsiones temporales en la respuesta del fotodiodo. Esto puede evitarse reduciendo el ancho de las zonas p y n y aumentando el ancho de la zona de agotamiento.

Los fotodiodos p-i-n tienen una capa de material semiconductor no dopado entre las zonas p y n. Esta capa (zona i) tiene alta resistencia, por lo que la mayoría de la caída de voltaje ocurre en ella. De esta manera, hay un gran campo eléctrico en esta zona, por lo que la zona de agotamiento se extiende a lo largo de ella y su tamaño puede variarse con su ancho. Por regla general, aumentar su ancho aumenta la responsividad del fotodetector, pero también aumenta su tiempo de respuesta.

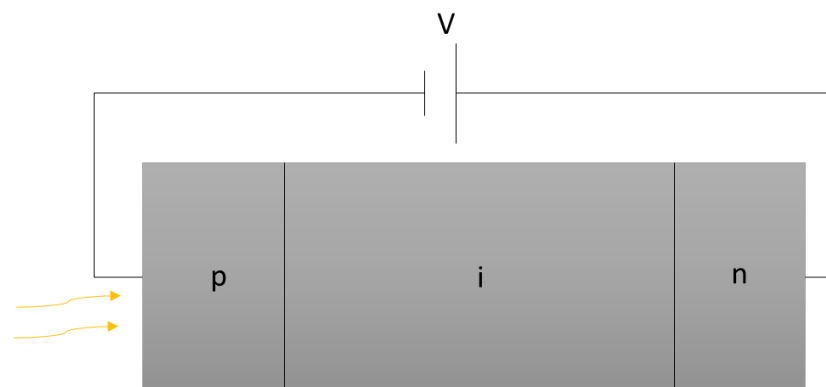


Figura 1.16 – Dibujo esquemático de un fotodiodo p-i-n

Capítulo 2 DESCRIPCIÓN DEL INTERROGADOR Y SUS COMPONENTES PRINCIPALES

2.1. Diseño del sistema interrogador

El objetivo final de este proyecto es el desarrollo de un interrogador para redes de sensores de fibra óptica. El diseño del interrogador está basado en la modulación directa de un láser y el control de su temperatura. Estas dos manipulaciones del láser permiten variar la longitud de onda a la que opera, generando el barrido que permite interrogar la red de sensores.

La modulación en intensidad del láser produce el *chirp*, esto, a efectos prácticos, consiste en una variación en la longitud de onda conforme se aumenta o disminuye la intensidad del láser. Por lo que, en una modulación directa, la longitud de onda del láser varía con una amplitud y frecuencia proporcional a la modulación. Además, para aumentar el rango de esta variación de la longitud de onda, se aumenta la temperatura del láser, lo que produce un efecto aún mayor sobre la longitud de onda del láser

Para poder alimentar, modular y controlar la temperatura de un láser, se utilizará un controlador de corriente y temperatura (Thorlabs CLD 1015). Este dispositivo permite la modulación directa de un láser, además de controlar su intensidad y temperatura con alta precisión. Además, puede configurarse de manera remota mediante un PC.

Para generar la señal moduladora y para capturar la señal a la salida del sistema se utilizará un dispositivo multifunción (Analog Discovery 2 de Digilent) con salidas de generador de funciones, entradas de osciloscopio y salidas digitales, con lo que se puede gestionar desde un mismo instrumento la generación de la señal moduladora, la recepción de la señal y el *trigger* del sistema, todo esto controlado de manera remota desde el mismo PC desde el que se controla la montura del láser.

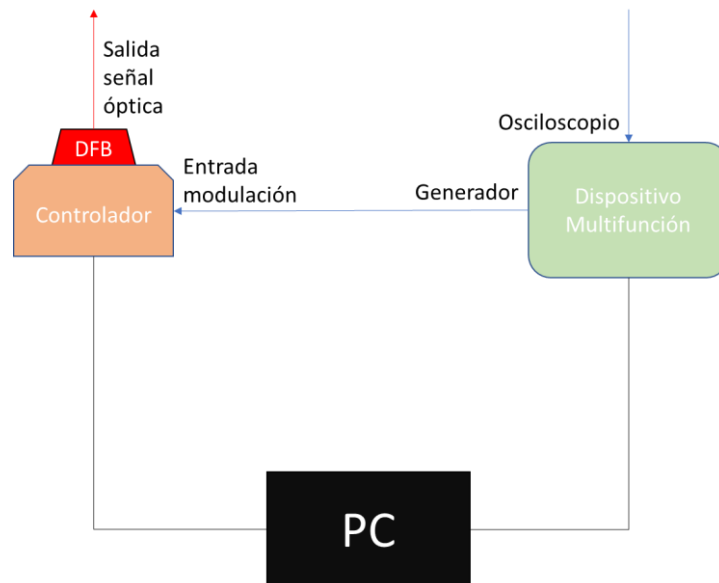


Figura 2.1 – Esquema de los componentes principales del interrogador

Esta filosofía se mantiene a lo largo de todo el proyecto, de manera que todo el sistema se gestiona desde un mismo PC utilizando el lenguaje de programación Python. La configuración y funcionamiento de estos dispositivos se explicarán en este capítulo, junto al *software* de control sincronizado que permitirá el montaje de un interrogador de bajo coste y altas prestaciones.

2.2. Controlador de corriente y temperatura para fuentes de luz

Una vez explicado el diseño básico del interrogador y los dispositivos necesarios para su montaje, hay que conocer las características de estos dispositivos para poder desarrollar el sistema de manera correcta. Principalmente se desea caracterizar el láser DFB utilizado para conocer en qué longitud de onda opera y cómo varía con la intensidad y la temperatura. Esto es de vital importancia para conocer la longitud de onda e intensidad óptica que tendrá el interrogador en cada momento.

2.2.1. Principio de funcionamiento

Antes de caracterizar el láser que se utilizará, es importante conocer los parámetros de interés, tanto del propio láser como del controlador. Para conocer el sistema se debe conocer exactamente como varía la longitud de onda del láser utilizado cuando se modifica su intensidad y su temperatura. Por esto, se utilizará un controlador que permite modificar la temperatura del láser con una precisión de 0.01 °C y la intensidad de este con una precisión de 0.1 mA.



Figura 2.2 – Imagen del controlador del láser [21]

El dispositivo utilizado será el controlador de corriente y temperatura CLD 1015 de Thorlabs. Este es un dispositivo diseñado para alimentar de manera precisa diodos láser en formato de empaquetado del tipo mariposa. El controlador permite suministrar hasta 1.5 A de corriente, pudiendo mantener la temperatura con una estabilidad de 0.005 °C. Además, incluye una entrada para la modulación directa y posibilidad de configurar la temperatura e intensidad y activar el láser y la modulación desde un PC o desde la pantalla táctil. Esta es una característica clave para el desarrollo del proyecto. El resto de las especificaciones pueden encontrarse en el anexo A.

2.2.2. Caracterización

El sistema propuesto está formado por el controlador de corriente y temperatura en el que se ha montado un láser DFB. La caracterización del láser se hizo modificando los parámetros de temperatura e intensidad manualmente con la pantalla del controlador, aunque en el sistema final se implementa de manera automática con el *software* desarrollado.

Los parámetros del láser caracterizados son la longitud de onda y la potencia del pico de emisión del láser respecto a la variación de la temperatura y la intensidad. Esto permite conocer el rango de interrogación de nuestro sistema, y también la compensación de potencia, si es necesaria, que se debe hacer para ver el espectro real del sensor en cuestión.

2.2.2.1. Resultados

A continuación, se presentan brevemente los resultados de más importancia en la caracterización del láser. Si se desea consultar el archivo completo de la caracterización desarrollada puede encontrarse en el anexo B.

En primer lugar, se comprueba la variación de longitud de onda de operación del láser al aumentar la temperatura gradualmente manteniendo la intensidad fija para 40 y 140 mA.

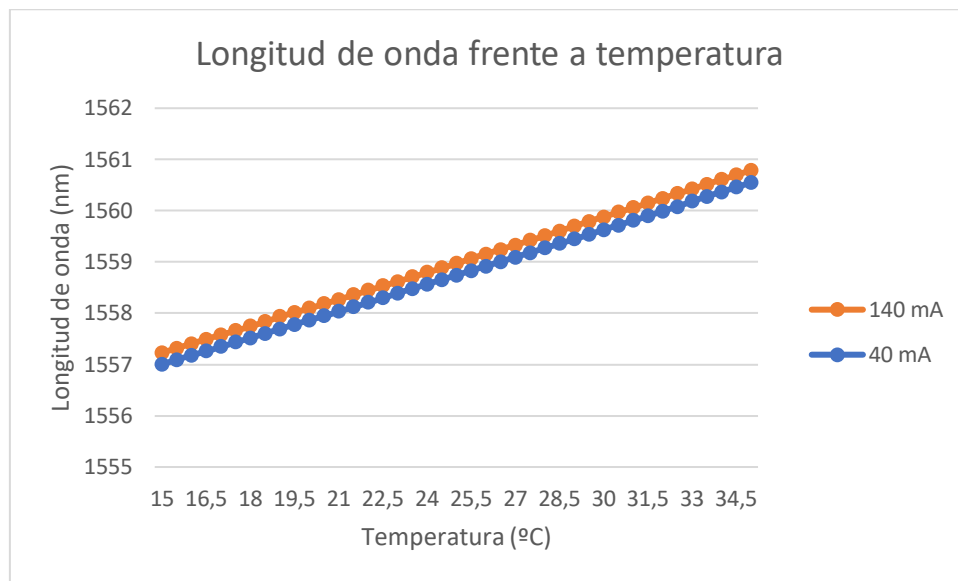


Figura 2.3 - Evolución de la longitud de onda del láser a una intensidad de 40 mA y 140 mA respecto a la temperatura

En la figura 2.4, se observa la variación en longitud de onda a una temperatura fija e intensidad variable.

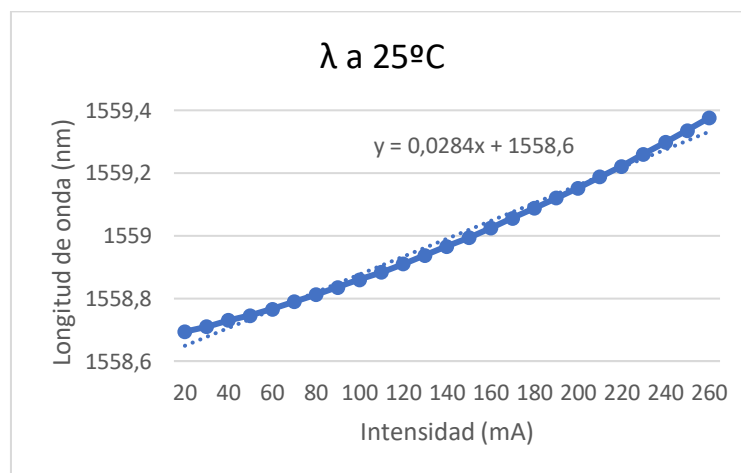


Figura 2.4 - Evolución de la longitud de onda del láser a una temperatura de 25°C respecto a la intensidad

Por último, en la figura 2.5 se muestra la caracterización de potencia emitida por el láser cuando se varía la corriente a diferentes temperaturas.

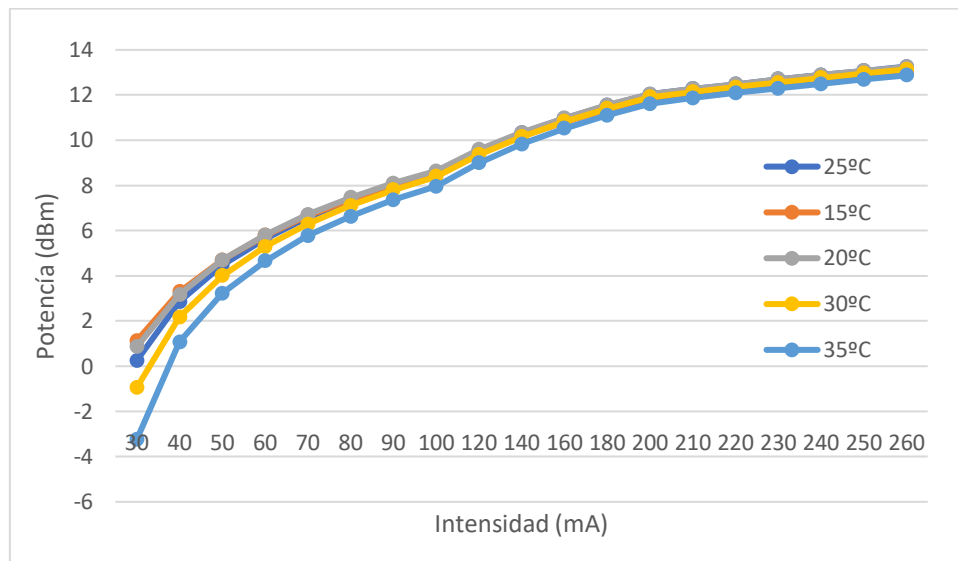


Figura 2.5 - Evolución de la potencia del pico en dBm respecto a la intensidad a diferentes temperaturas

Se observa en las dos primeras gráficas (Figuras 2.2 y 2.3) que el aumento de temperatura está linealmente relacionado con el aumento en longitud de onda del pico del láser, este fenómeno se utilizará en beneficio del desarrollo del sistema.

Con estas gráficas también se observa el rango de funcionamiento del sistema, que será de 1557 a 1561 nm, es decir, un rango de al menos 4 nm, o incluso más si extendemos el rango de variación de temperatura. Por cada ciclo de modulación obtenemos una variación de 0.7 nm en 140 mA, es decir, se tiene alta resolución de interrogación en al menos 0.7 nm por ciclo, extensible con la temperatura.

Por último, se observa que la variación de potencia emitida respecto a la intensidad del láser no es igual en todas las temperaturas. Esto habrá que tenerlo en cuenta cuando sea necesario compensar la potencia para reconstruir el espectro de un sensor de manera correcta.

2.3. Generador de funciones y Osciloscopio

Como se ha explicado anteriormente, se usa el efecto del *chirp* producido al variar la intensidad del láser para recorrer el espectro en longitud de onda, lo que nos permite reconstruir el espectro del sensor o sensores del sistema interrogador. Para producir esta variación en intensidad en el láser de manera rápida y automática se utiliza la entrada de modulación del controlador para modular el láser en intensidad. Esta modulación se genera con el dispositivo multifunción con *Analog Discovery 2* (AD2) (anexo C) programable a través del PC, de esta forma se ha automatizado el sistema siguiendo la filosofía de este proyecto de manejar todos los dispositivos de manera remota desde el *software* desarrollado.

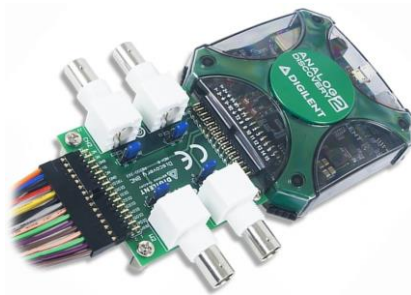


Figura 2.6 – Imagen de un Analog Discovery 2 [22]

Como se ha dicho, el osciloscopio usado es el mismo dispositivo que el generador de funciones. El dispositivo tiene dos canales de entrada para el osciloscopio con un ancho de banda de 30 MHz. La adquisición de las muestras y su procesado para la reconstrucción de los espectros de los sensores se explicarán en profundidad en capítulos posteriores.

Los detalles de programación de la modulación y procesado de los datos se explican en el Capítulo 3. El diseño de la forma de onda de la señal moduladora, el *trigger* y la adquisición de datos se desarrollan en el Capítulo 4.

2.4. Conclusiones

Estos dispositivos permiten, gracias a sus características, tener un sistema interrogador completamente programable desde el PC, fácilmente configurable y con altas prestaciones a bajo precio. El sistema, como se verá más adelante, llega a dar un rango cercano a 1 nm solo con el chirp de la modulación directa, ampliable a 6 nm con la variación de temperatura, además de una resolución de 0.1 pm en longitud de onda con WDM, y cerca de 1 pm con TDM.

Los precios de estos dispositivos son los siguientes:

- Analog Discovery 2: 253,39€
- Thorlabs CLD 1015: 2.153,19€

Añadiendo el precio aproximado de un láser DFB a 1500 nm (unos 2.000€), el coste total queda muy por debajo del precio de un interrogador típico de FBGs, que llega a los 20.000€.

En conclusión, la elección de estos dispositivos ha sido realizado con criterios económicos y prácticos, ya que permitirás desarrollar un sistema de bajo coste y altas prestaciones, además de ser fácilmente programables.

Capítulo 3 **DESARROLLO DEL SOFTWARE DE CONTROL**

3.1. Introducción

Python es un lenguaje de programación potente y fácil de aprender [23]. Tiene estructuras de datos de alto nivel eficientes y un acercamiento a la programación orientada a objetos simple pero efectiva. La elegante sintaxis y el tipado dinámico, junto a su naturaleza interpretada lo hace un lenguaje ideal para desarrollar aplicaciones en muchas áreas y en la mayoría de plataformas.

En este proyecto se utilizará Python debido principalmente a ser de código abierto y tener una gran cantidad de módulos extra, además de ser compatible con lenguajes de bajo nivel como C y C++, características que son muy útiles en el desarrollo del proyecto.

En este capítulo se presenta el software desarrollado para manejar el controlador láser y el dispositivo multifunción. Se han realizado funciones generales para el control de los dispositivos, con estas funciones se realiza también el interrogador, pero pueden servir para manejar los dispositivos en otras aplicaciones.

3.2. Software para el controlador Thorlabs CLD1015

Para el manejo y configuración del controlador del láser se han realizado dos funciones. La primera de ellas sirve para conectar el controlador al PC y activar el láser a la intensidad indicada. También activa la entrada de modulación y deja el dispositivo en espera de nuevas instrucciones.



Figura 3.1 – Función conectarLaser(I)

La segunda función configura la temperatura. Esta función tiene un bucle de estabilización que evita que el programa continúe hasta que la temperatura a la que está el láser es la misma que se ha indicado en la función.

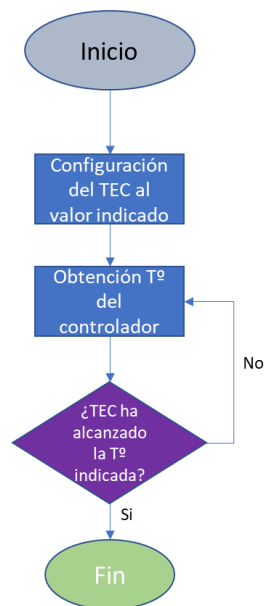


Figura 3.2 – Función tempLaser(T)

3.3. Software de control del dispositivo Analog Discovery 2

Al igual que con el controlador del láser, se han realizado varias funciones generales para el manejo del generador de funciones y el osciloscopio del dispositivo multifunción utilizado. La primera de ellas sirve para conectarlo al PC y dejarlo a la espera de nuevas instrucciones sin que se desactive hasta que se le indique. Además, se asignan valores globales a los dos canales para poder referirse a ellos a lo largo de todas las funciones.



Figura 3.3 – Función conectar AD2()

En cuanto al generador de funciones y la generación de señales, se ha separado su manejo en cuatro funciones. La primera de ellas sirve para activar un pulso de reloj mediante una salida digital del dispositivo, que tendrá la frecuencia y el *duty* indicados en la entrada de la función. Esta señal se puede utilizar como *trigger* del sistema para mantener sincronizadas las demás señales generadas, y para sincronizar estas con la captura en el osciloscopio.

Las dos funciones siguientes sirven para configurar los canales del generador de funciones. La primera de ellas sirve para configurar el canal con una señal que sea de una de las formas predeterminadas (senoidal, cuadrada, etc.), mientras que la siguiente permite introducir un array de datos que indiquen los valores de los puntos de la señal.

Por último, está la función que activa el canal indicado para que se lance la señal configurada en él.

- ***triggerDigital(freq,duty)***: Configura y ejecuta el *trigger* digital con la frecuencia y el duty deseados
- ***configurarGen(channel,function,freq,amp,sym,phase)***: Configuramos el canal deseado con una de las formas predeterminadas.

channel: channel1(0), channel2(1)

function: funcDC, funcSine, funcSquare, funcTriangle, funcRampUp, funcRampDown, funcNoise, funcCustom, funcPlay

freq en Hz

amp en V

sym en %

phase en grados

- ***configurarGenCustom(channel,freq,amp,phase,rgdSamples)***: Configuramos el canal con un array de datos como valores de la señal.

channel: channel1(0), channel2(1)

freq en Hz

amp en V

phase en grados

rgdSamples: Array de muestras en caso de hacer una función con un array de valores

- ***activarGen(channel)***: Activamos el canal indicado

Para el uso y la configuración del osciloscopio también se han desarrollado varias funciones generales. La primera y principal consiste en la configuración de los parámetros del osciloscopio, la segunda es una simple variación de la primera para el caso en que se utilice uno de los canales del generador de funciones como *trigger* del dispositivo, lo que permite no tener que utilizar la salida digital y la tercera captura la señal recibida en el osciloscopio y los guarda en un array.

- ***configurarOsc(freq)***: Se configura el osciloscopio con el *trigger* externo.
- ***osciloscopioTrigger(freq)***: Se configura el osciloscopio con el *trigger* en un canal del generador de funciones.
- ***capturar()***: Se obtienen los datos del osciloscopio.

3.4. Sistema de interrogación básico.

3.4.1. Introducción

Una vez descritas las funciones de control desarrolladas para el manejo de los dispositivos se puede comenzar con la descripción de su uso para el desarrollo de un sistema interrogador. El primero de ellos consiste en un interrogador de alta resolución para uno o varios sensores multiplexados en longitud de onda. Los *scripts* completos pueden consultarse en el anexo D.

El sistema consiste en la montura láser (apartado 2.2.1) con el láser DFB (caracterizado en el apartado 2.2.2) modulado por una señal emitida por el generador de funciones (apartado 2.3). La señal óptica resultante pasa por un sensor modificando la luz, que es recibida en el fotodetector, que la convierte a una señal eléctrica y llega al osciloscopio. Finalmente, la señal del osciloscopio es procesada y representada en el PC.

3.4.2. Bucle de búsqueda del sensor mediante el barrido de temperatura

Después de utilizar las funciones de conexión indicadas anteriormente, se pasa a un bucle con el objetivo realizar un primer barrido mediante la variación de temperatura, que de esta forma se recorren varios nanómetros. Esto permite encontrar la longitud de onda aproximada a la que se encuentra el sensor, para luego hacer el barrido de alta resolución de la modulación directa, el cual recorre menos de un nanómetro, como se ha visto en la caracterización del capítulo anterior.

Este barrido se configura dando un valor mínimo y máximo de temperaturas, además del tamaño del salto que se realiza en cada iteración del bucle. El controlador de temperatura de la montura comienza con el valor de temperatura mínimo, y en cada iteración cambia a la temperatura correspondiente hasta que sobrepase la temperatura máxima, entonces el bucle acaba y el programa continúa.

En cada punto que se recorre se obtiene un valor de DC (valor medio) que se guarda en un archivo de texto y se representa en una gráfica. Allí donde el valor de DC sea más alto es donde se encuentra el pico del sensor, y si se desea encontrar el valle, se busca el valor más bajo. Este valor se utilizará más adelante para obtener la respuesta de alta resolución del sensor.

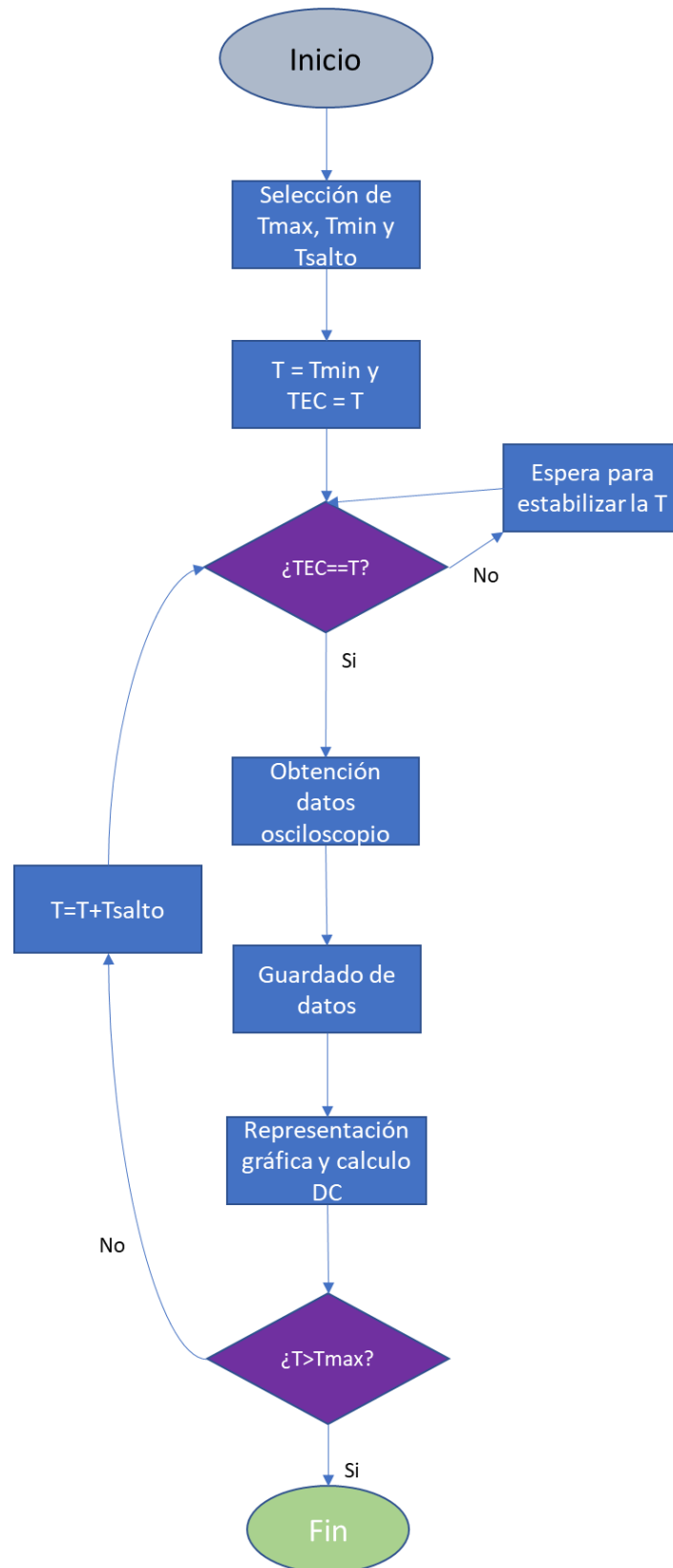


Figura 3.4 – Diagrama de flujo del bucle de temperatura

3.4.3. Búsqueda del pico o valle y obtención del corrector de potencia del láser

Una vez encontrada la temperatura a la que se encuentra el sensor, se debe tener en cuenta un fenómeno que ocurre al modular el láser en intensidad. Al cambiar la intensidad del láser, cambia la potencia con la que emite, esto distorsiona las medidas realizadas con el interrogador. Para evitar esto, se desarrolla un programa que caracteriza la potencia de emisión del láser a cada temperatura e intensidad para diferentes formas de onda de modulación y lo guarda en archivos de texto. Esta librería de caracterización se utiliza para realizar una corrección de potencia en la señal obtenida con el interrogador. El script que realiza esta caracterización y crea los archivos de texto se encuentra en el anexo D.

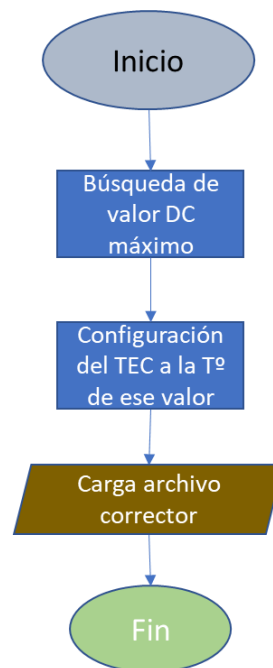


Figura 3.5 – Diagrama de flujo de la búsqueda del **pico**

3.4.4. Bucle de modulación en intensidad

Una vez se conoce la temperatura a la que se encuentra el punto de interés y se tienen los datos del corrector, solo queda comenzar la modulación para realizar el barrido de alta resolución. Debido al efecto del *chirp* explicado anteriormente, se realizará un

barrido en longitud de onda de alta resolución centrado en la temperatura donde se encuentra el sensor. Las funciones que se encargan de la generación de la señal moduladora y de la captura de la señal del fotodetector en el osciloscopio pueden encontrarse en el anexo D.

El programa configura el controlador láser a la temperatura donde se ha obtenido el valor de DC máximo o mínimo y activa la generación de la señal moduladora con la amplitud y frecuencia indicados, a su vez activa el osciloscopio e inicia un bucle con varios procesos. La amplitud de la señal determina el rango del barrido, mientras que la frecuencia afecta a la velocidad de estos barridos, es decir, la resolución temporal.

En primer lugar, se comprueba que se continúa en la temperatura deseada, esto evita obtener resultados falsos si fallara el controlador de temperatura, esto se comprueba de nuevo para asegurarse que la temperatura del láser no se ha alejado de la temperatura donde se encontró el sensor. También se crea el eje de longitud de ondas para ver en que longitudes de onda encuentra el sensor y se realiza la corrección de potencia de la señal recibida en el osciloscopio con el corrector explicado anteriormente. Por último, se representa la señal obtenida.

En este momento el programa se encuentra en un bucle infinito, de forma que la señal se está representando en tiempo real. Para finalizar el proceso se pulsan las teclas “ctrl+Z” y el bucle se rompe dando paso a la desconexión de la modulación, láser, TEC, y AD2.

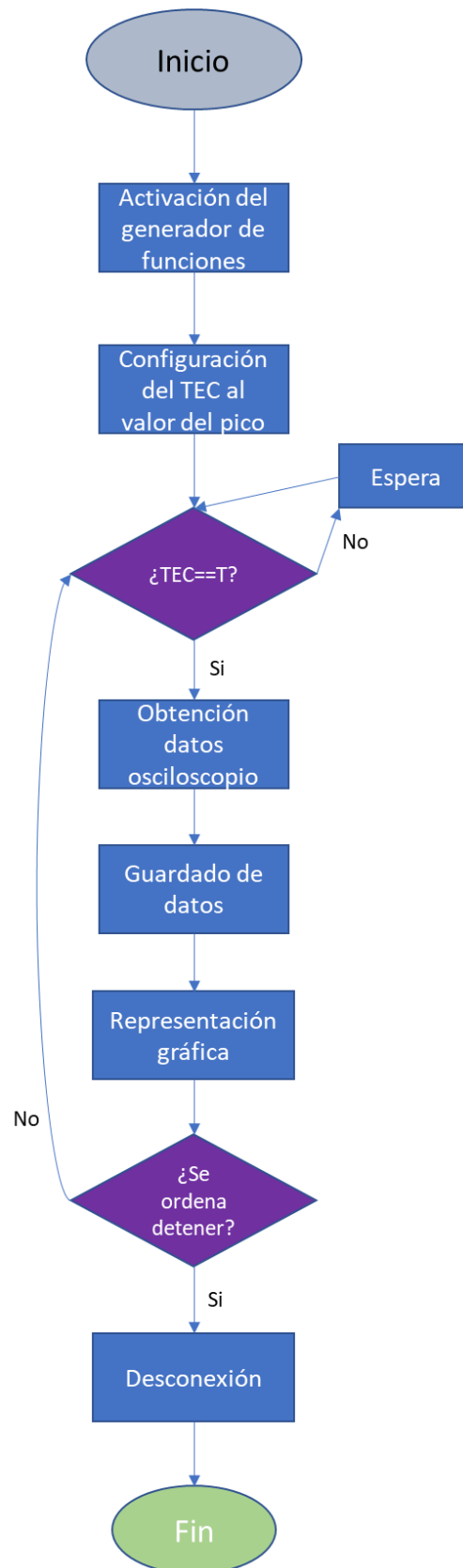


Figura 3.6 – Diagrama de flujo del interrogador

3.5. Interrogador WDM y TDM para redes de sensores de fibra óptica

El sistema final y objetivo último de este proyecto es el desarrollo de un interrogador de redes de sensores de fibra óptica de bajo coste utilizando la modulación directa y externa en intensidad del láser. Para conseguir esto, se modificará la forma en que se modula el láser respecto al apartado anterior. En primer lugar, para conseguir la propiedad de separar varios sensores en el dominio del tiempo, la modulación continua y directa del láser es pulsada. Debido a que el láser no puede emitir pulsos a tan altas frecuencias, se utiliza un modulador externo que hará esta función pulsando la señal de manera periódica. Para evitar que las reflexiones de la luz debida a los sensores distribuidos a lo largo de la red se superpongan, el periodo de repetición entre cada pulso debe ser mayor que el tiempo que pasa cada pulso en la red. Además, la distancia entre sensores en la red debe ser mayor que la anchura del pulso para evitar que la señal de cada sensor se superpongan.

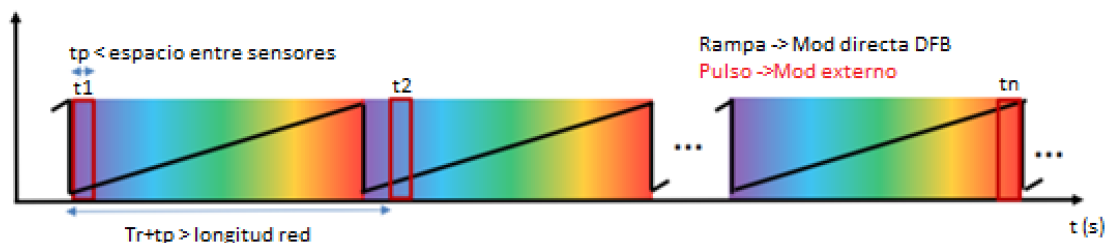


Figura 3.7 – Representación esquemática del principio de operación del sistema interrogador

El principio de funcionamiento de esta técnica de multiplexación se muestra en la figura 3.7. Teniendo esto en cuenta e imponiendo un periodo de repetición de pulso, el espectro puede ser reconstruido concatenando las reflexiones de estos. La resolución espectral obtenida está limitada por el ancho del pulso, el cual también limita la resolución espacial. En definitiva, cuanto más estrecho es el pulso, mayor es la resolución. Un pulso estrecho conseguiría mayor resolución, pero aumentaría el tiempo de escaneo, ya que habría que hacer más pulsos para realizar el barrido.

Además, aunque se tiene información continua en longitud de onda por cada pulso reflejado, para aumentar la SNR y evitar efectos no lineales, se obtiene el valor medio de la reflexión del pulso recibido.

La modulación directa del láser se hace con una señal diente de sierra (a diferencia del seno del apartado anterior) emitido por el generador de funciones. Una señal diente de sierra nos permite tener linealidad durante todo el barrido de longitud de onda, además de tener todo el periodo en dirección ascendente. Esta modulación en intensidad es añadida al aumento de temperatura gradual producido por el controlador termoelectrónico (TEC) del controlador del láser. Así, se realizan medidas de alta resolución con la modulación y, a continuación, se repite el proceso para diferentes temperaturas, de forma que aumentamos el rango de interrogación.

En el apartado siguiente se explicará el *software* desarrollado para el control de los dispositivos, la representación de la señal obtenida en el osciloscopio y la creación de archivos para guardar los datos.

3.5.1. Módulo de conexiones de dispositivos remotos al PC

Al igual que en la primera parte del proyecto, se utilizará un controlador para láser DFB de Thorlabs y un dispositivo multifunción con osciloscopio y generador de funciones Analog Discovery 2 (AD2). El código necesario para conectarse a ellos está descrito anteriormente y se utilizará de la misma manera.

3.5.2. Módulo de configuración del generador de funciones y el osciloscopio

En primer lugar, se creará un pulso de reloj que será utilizado como *trigger* del sistema. Esta señal se configura con una frecuencia de 1 kHz y se emite por una de las salidas digitales del dispositivo.

En el canal 1 se generará una señal diente de sierra que se utilizará para la modulación directa del láser. Este tipo de señal permite un aumento de la intensidad de manera

lineal y siempre de forma ascendente. La señal se configura con una amplitud de 0.8 V y una frecuencia de 1 kHz.

En el canal 2 se generará una señal personalizada que consiste en pulsos cuadrados con un índice de simetría elegido en función del tamaño que interese en estos pulsos. La función de estos pulsos cuadrados se ha explicado en el apartado anterior.

Por último, se configura el osciloscopio de manera similar a lo hecho en apartados anteriores, con la diferencia principal del *trigger*, que en este caso se configura mediante la señal de reloj ya comentada. Este *trigger* es crítico en el sistema, ya que es absolutamente necesario que el pulso de cada ciclo sea el pulso inmediatamente posterior al pulso anterior en la rampa del diente de sierra, esto es lo que permite la reconstrucción del espectro al final del proceso del interrogador. Por lo tanto, la señal diente de sierra y la señal de pulsos cuadrados tienen que estar perfectamente sincronizadas entre ellas, y estas con el osciloscopio.

3.5.3. Bucle del interrogador

El bucle comenzará con la mínima temperatura indicada en el controlador y creará un archivo para almacenar los datos. Una vez alcanzada esta temperatura, comenzará la modulación del láser mediante la señal moduladora de forma diente de sierra. Además, la modulación externa de pulsos cuadrados determinará el número de ciclos del bucle, ya que hay que recorrer la rampa del diente de sierra un número de veces igual al tamaño del pulso entre el periodo del diente. En cada uno de estos ciclos se obtendrá la señal reflejada correspondiente a un fragmento de la rampa que forma el diente de sierra, que en su posición temporal hará referencia a uno de los sensores distribuidos a lo largo de la red. Esta señal se recibe en el osciloscopio y se almacena en un archivo, donde se guardarán las partes de interés en *arrays*, los cuales se utilizarán para realizar una representación del espectro de la red de sensores. Una vez hechos todos los ciclos, se producirá un salto de temperatura del tamaño que se haya indicado y se comenzará de nuevo el bucle hasta finalizar todo el recorrido del interrogador.

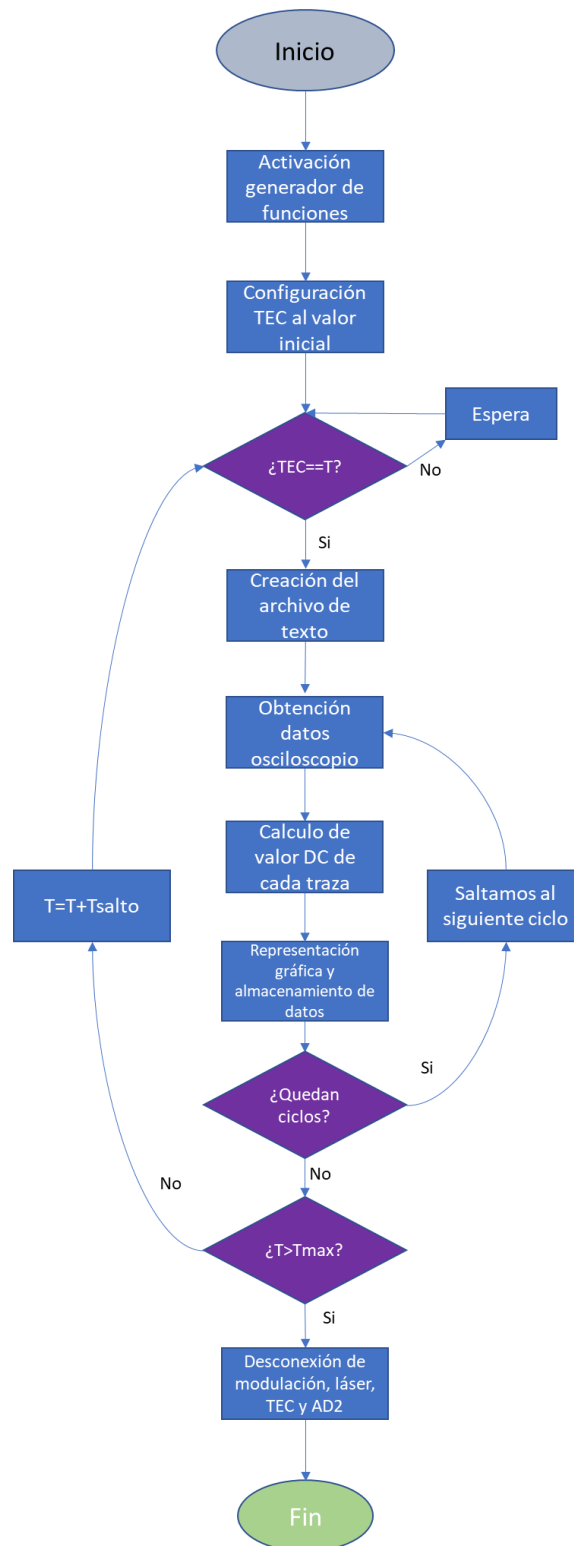


Figura 3.8 – Diagrama de flujo del interrogador WDM/TDM

CAPITULO 4 INTERROGACIÓN DE UNA RED DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

4.1. Introducción

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema y del *software* que lo controla, se realizan dos montajes diferentes, uno para cada uno de los sistemas desarrollados anteriormente.

El primero consiste en una red sencilla con un solo sensor, en este caso un Fabry-Pérot, y el segundo consiste en una red de varios tipos de sensores y dispositivos diferentes, algunos de los cuales operan a la misma longitud de onda.

4.2. Caracterización de una cavidad Fabry-Pérot

Como parte del aprendizaje y el desarrollo natural del sistema, primero se prueba a interrogar un solo sensor (en este caso se ha elegido una cavidad Fabry-Pérot) para comprobar que la idea base del proyecto funciona y es viable para expandirla a algo más complejo como es la interrogación de una red de sensores.

El material utilizado para la realización de los experimentos de este apartado es el siguiente:

- Láser DFB
- Controlador de diodo láser
- Generador de funciones/Osciloscopio
- Cavidad Fabry-Pérot
- Fotodetector
- Fuente de alimentación
- PC

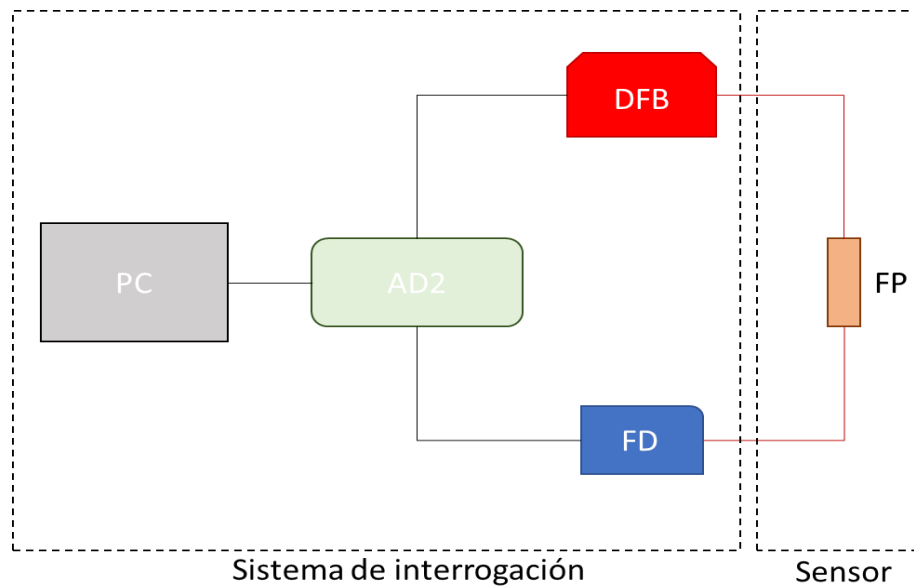


Figura 4.1 – Diagrama esquemático del sistema básico con un sensor

En la figura 4.1 se presenta el diagrama esquemático del montaje experimental para la interrogación de la cavidad Fabry-Pérot. Este está formado por el sistema de interrogación, que como se ha presentado está formado por un láser DFB, el fotodetector (PD) y el generador/osciloscopio (AD2). Estos están controlados por un PC mediante el *software* desarrollado. Al sistema de interrogación se ha conectado la cavidad FP.

Como se ha explicado en el Capítulo 1, se utilizarán las propiedades del láser de variar su longitud de onda de operación al modularlo en intensidad (*chirp*) y al aumentar su temperatura. Para los saltos grandes de longitud de onda se hace uso del controlador de temperatura del láser, y para los barridos más pequeños se hace uso del modulador.

La señal moduladora elegida determina el rango del barrido en longitud de onda a través de su amplitud, y también la frecuencia y la forma de este. En este caso se ha elegido una señal senoidal con frecuencia de 1 kHz y una amplitud de 0.8 V. Esta amplitud da un rango suficiente en el barrido del *chirp* y la forma senoidal consigue una variación casi lineal en la intensidad del láser.

4.3. Interrogación de una red de sensores de fibra óptica

El sistema interrogador WDM y TDM se prueba realizando el montaje de la figura 4.2. Este montaje consta de tres acopladores colocados a 6 Km de distancia de la estación de monitorización y separados 5 Km entre ellos. En las salidas de los acopladores se colocan FBGs (FBG1-4), un espejo y un sensor de temperatura Fabry-Pérot (S1) como se indica en la figura. Esta red permite mostrar la capacidad del sistema de interrogar diferentes tipos de sensores, ya que tenemos tres FBG con una longitud de onda central casi idéntica, otro FBG diferente, un reflector con gran ancho de banda y un resonador con varios picos a lo largo del espectro.

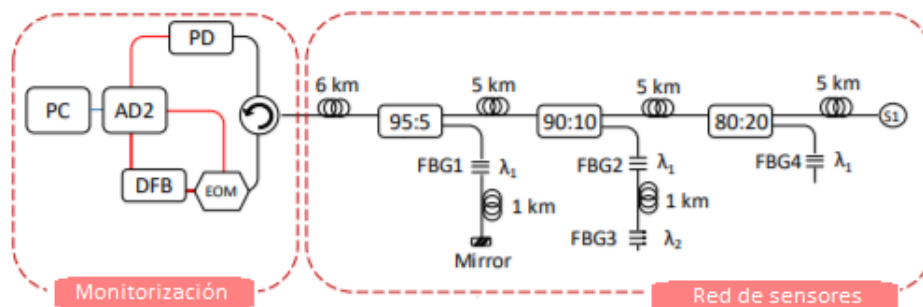


Figura 4.2 – Esquema de la red propuesta para la interrogación WDM/TDM

La lista de material utilizado para la realización de este experimento es la siguiente:

- Láser DFB
- Controlador de diodo láser
- Generador de funciones/Osciloscopio
- Fotodetector
- Fuente de alimentación
- Modulador
- 4 FBGs
- Interferómetro Fabry-Pérot
- Espejo
- 3 acopladores
- Circulador
- Carretes de fibra SMF28
- PC

La estación de monitorización se controla mediante el *software* desarrollado y explicado en detalle a lo largo del Capítulo 3. Desde este programa activamos y controlamos el TEC del controlador del láser, también generamos las señales para la modulación y procesamos, almacenamos y graficamos la señal recibida en el osciloscopio.

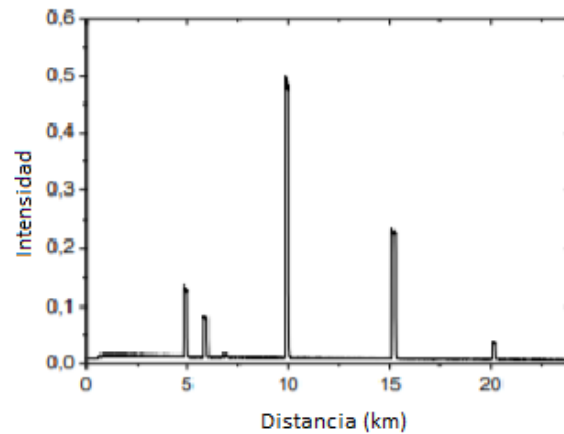


Figura 4.3 – Trazas del osciloscopio producida por la reflexión de un pulso

La figura 4.4 representa una traza de la red propuesta. Se observa la potencia reflejada por un solo pulso respecto a la distancia, o lo que es lo mismo, la potencia reflejada en una sola longitud de onda. Se obtienen trazas para cada longitud de onda, por lo que se puede realizar una reconstrucción de alta resolución del espectro de los sensores a lo largo de la red.

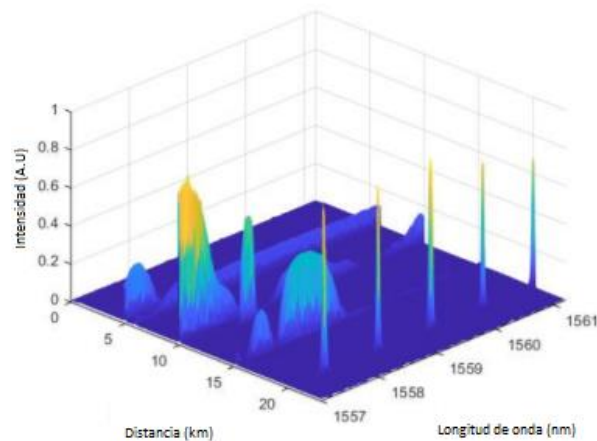


Figura 4.4 – Graficado 3D de la distribución en distancia y longitud de onda de la red interrogada

Como se ha mencionado anteriormente, la resolución del sistema es proporcional al ancho del pulso. En este caso, el periodo de la rampa es $T=1$ ms y el ancho del pulso es $2\text{ }\mu\text{s}$, lo que equivale a un ancho en longitud de onda de 0.6 nm , dando una resolución de 1.2 pm y una tasa de escaneo de 501 ms .

4.3.1. Resultados

Para demostrar el correcto funcionamiento del sistema, se caracteriza un FBG aplicando una deformación y se realiza un barrido en temperatura al Fabry-Pérot. Interrogando ambos sensores se observa la respuesta lineal esperada en dispositivos de estas características, es decir, se observa un aumento en la longitud de onda cuando se aumenta la tensión o la temperatura.

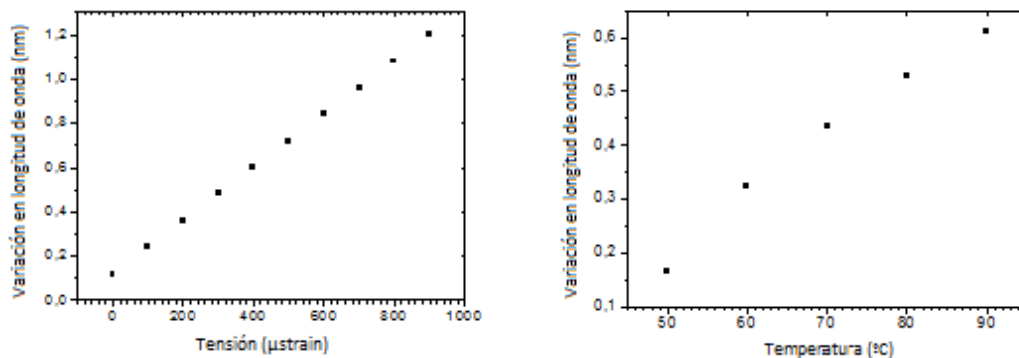


Figura 4.5 – Comportamiento en longitud de onda estirando el FBG4 (izquierda) y comportamiento en longitud de onda frente a la temperatura del S1 (derecha) al interrogarlos con el sistema

Capítulo 5 CONCLUSIONES

En conclusión, este proyecto presenta un sistema interrogador para sensores de fibra óptica de bajo coste basado en la modulación directa y en el control de temperatura de un diodo láser DFB.

El sistema y sus componentes son controlados mediante un *software* desarrollado en Python que permite el control remoto del interrogador, desde su configuración e inicio hasta su monitorización en tiempo real. Este software permite configurar parámetros como la variación de la temperatura, la amplitud y frecuencia de la modulación, o el número de ciclos de interrogación. Estos parámetros pueden cambiar la resolución o la velocidad de interrogación del sistema. Además, el *software* monitoriza en tiempo real y almacena todos los datos en archivos.

El sistema se ha demostrado en un rango de 0.9 nm solo con el *chirp* de la modulación, extendido a 6nm mediante el control de temperatura con una resolución de hasta 0.1 pm. También se ha demostrado su funcionamiento caracterizando un sensor de temperatura Fabry-Pérot.

Por último, se ha desarrollado un sistema de multiplexación en tiempo y longitud de onda (WDM-TDM) pulsando secuencialmente la señal modulada del láser alcanzando una resolución de 1 pm. Este sistema se ha demostrado en una red de sensores de diferentes tecnologías y capaces de medir distintos parámetros.

Pese a todas capacidades del sistema interrogador desarrollado, existen posibles líneas futuras de mejora.

- Mejora del sistema de sincronización: El *trigger* del sistema consigue mantener las señales sincronizadas, pero no siempre la señal comienza al principio de la rampa.

- La reconstrucción 3D del espectro de la red de sensores se realiza con los datos recogidos con el sistema interrogador, pero el procesado y el graficado de los datos se ha realizado en un *software* aparte que no forma parte del proyecto.
- Rebajar más las especificaciones requeridas del sistema, por ejemplo, utilizando modulación directa para los pulsos, en lugar de un modulador externo.
- Una evolución natural del sistema iría en la dirección de adaptarlo a una solución DAS (*Distributed Acoustic Sensing*).

Los resultados generados de este proyecto han sido recogidos en el artículo ***“WDM and TDM interrogation by sequentially pulsing direct modulated DFBs”***, y ha sido aceptado y seleccionado para su presentación en ***“The 27th International Conference on Optical Fiber Sensors”***.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. A. Perez-Herrera and M. Lopez-Amo, "Fiber optic sensor networks", *Opt. Fiber Technol.*, 19, 6, Part B, pp. 689-699, (2013)
- [2] A. R. Calawa, J. O. Dimmock, T. C. Harman, y I. Melngailis, "Magnetic Field Dependence of Laser Emission in Pb₁-XSnXSe Diodes", *Phys. Rev. Lett.*, 23, 1, pp. 7-10, (1969)
- [3] J. M. Besson, J. F. Butler, A. R. Calawa, W. Paul, and R. H. Rediker, "Pressure-tuned PbSe diode laser", *Appl. Phys. Lett.*, 7, 8, pp. 206- 208, (1965)
- [4] L. S. Yan, A. Yi, W. Pan, and B. Luo, "A Simple Demodulation Method for FBG Temperature Sensors Using a Narrow Band Wavelength Tunable DFB Laser", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 22, 18, pp. 1391-1393, (2010)
- [5] D. Leandro, V. deMiguel Soto, R. A. Perez-Herrera, M. B. Acha, and M. López-Amo, "Random DFB Fiber Laser for Remote (200 km) Sensor Monitoring Using Hybrid WDM/TDM", *J. Light. Technol.*, 34, 19, pp. 4430-4436, (2016)
- [6] Wikipedia, "Refracción y reflexión" [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Refracci%C3%B3n_y_reflexi%C3%B3n.svg
 Autor: Jossel7 [Accedido: 13-march-2020]
- [7] The Fiber Optic Association, "FOA Reference Guide To Fiber Optics." [En línea]. Disponible en: <https://www.thefoa.org/tech/ref/OSP/fiber.html> [Accedido: 13-march-2020]
- [8] B.Lee "Review of the present status of optical fiber sensors", *Optical Fiber Technology*, vol. 9, pp. 59,79 (2003)
- [9] Sabri N., Aljunid S.A., Salim M.S., Fouad S. Fiber Optic Sensors: Short Review and Applications. In: Gaol F., Shrivastava K., Akhtar J. (eds) *Recent Trends in Physics of Material Science and Technology*. Springer Series in Materials Science, vol 204. Springer, Singapore (2015)

- [10] K. O. Hill and G. Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1263-1276, (1997)
- [11] Pavel Mec, Marcel Fajkus, Stanislav Zabka, Martin Novak, Rene Jaros, "Design of encapsulation of fiber Bragg grating for the traffic applications," *Proc. SPIE 11028, Optical Sensors*, (2019)
- [12] T. Yoshino, K. Kurosawa, K. Itoh and T. Ose, "Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometer and its Sensor Applications," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 30, no. 10, pp. 1612-1621, (1982)
- [13] RP Photonics Encyclopedia, "Fabry-Perot Interferometers" [En línea]. Disponible en: https://www.rp-photonics.com/fabry_perot_interferometers.html [Accedido: 8-june-2020]
- [14] R. Leiderman, C. J. S. Matos, Arthur M.B. Braga, Walter Margulis, L. C. G. Valente, "Interrogation methods for fiber Bragg grating sensors," *Proc. SPIE 3666, International Conference on Fiber Optics and Photonics: Selected Papers from Photonics India '98*, (1999)
- [15] Researchgate "Descubriendo la materia mediante luz láser. La espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS) como método para determinar la composición elemental de la materia" [En línea] Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Figura-20-Emission-estimulada-de-la-radiacion_fig16_303857009 [Accedido: 9-june-2020]
- [16] Haken H. Laser Theory. In: Genzel L. (eds) *Light and Matter Ic / Licht und Materie Ic. Encyclopedia of Physics / Handbuch der Physik*, vol 5 / 25 / 2 / 2c. Springer, Berlin, Heidelberg (1970)
- [17] RP Photonics Encyclopedia, "Distributed feedback lasers, DFB laser" [En línea]. Disponible en: https://www.rp-photonics.com/distributed_feedback_lasers.html [Accedido: 8-june-2020]

- [18] Thorlabs, “Pigtailed, Distributed Feedback (DFB) Single Frequency Lasers” [En línea]. Disponible en:
https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7928
[Accedido: 8-june-2020]
- [19] Thorlabs, “Fiber Coupler Tutorials” [En línea]. Disponible en:
https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=10758
[Accedido: 8-june-2020]
- [20] Govind P. Agrawal, “Fiber-Optic Communication Systems”, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, vol. 3, pp. 123-124, (2012)
- [21] Thorlabs, “Compact Laser Diode Driver With TEC and Mount for Butterfly Packages” [En línea]. Disponible en:
https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_ID=5882
[Accedido: 8-june-2020]
- [22] Digilent, “Getting The Most Out Of Your Analog Discovery: Lab 2” [En línea] Disponible en: <https://blog.digilentinc.com/getting-the-most-out-of-your-analog-discovery-lab-2/> [Accedido: 8-june-2020]
- [23] Python Software Foundation, “What is Python: Executive Summary” [En línea] Disponible en: <https://www.python.org/doc/essays/blurb/> [accedido:8-june-2020]

ANEXO A Especificaciones del controlador del diodo laser Thorlabs CLD 1015

Laser Diode Driver Specifications

	Via Front Panel ^a	Via Remote Control ^a
Current Control (Constant Current Mode)		
Control Range	0 to 1.5 A	
Compliance Voltage	>4 V	
Resolution	100 μA	50 μA
Accuracy	±(0.1% + 500 μA)	
Noise and Ripple (Typical; 10 Hz to 10 MHz, RMS; @ 3.3 Ω Load, Current <1.2 A)	10 μA without Noise Reduction Filter 5 μA with Noise Reduction Filter	
Drift (24 Hours)	<50 μA @ 0 - 10 Hz in Constant Ambient Temperature	
Temperature Coefficient	<50 ppm/°C	
Current Limit		
Setting Range	1 mA to 1.5 A	
Resolution	100 μA	50 μA
Accuracy	±(0.12% + 800 μA)	
Photodiode Input		
Photocurrent Measurement Ranges ^b	0 to 2 mA (Low) 2 to 20 mA (High)	
Photocurrent Resolution ^b	100 nA (Low) 1 μA (High)	70 nA (Low) 700 nA (High)
Photocurrent Accuracy ^b	±(0.08% + 0.5 μA) (Low) ±(0.08% + 5 μA) (High)	
Photodiode Reverse Bias Voltage	0.1 to 6 V	
Photodiode Input Impedance	~0 Ω (Virtual Ground)	
Power Control (Constant Power Mode)		
Photocurrent Control Ranges ^b	0 to 2 mA (Low) 0 to 20 mA (High)	
Laser Voltage Measurement		
Resolution	1 mV	200 μV
Accuracy	±(1% + 40 mV)	
Laser Overvoltage Protection		
Trip Voltage (Typical)	4.2 V	
Modulation Input		
Input Voltage	±10 V	
Input Impedance	10 kΩ	
3 dB Small Signal Bandwidth (Constant Current Mode)	DC to 250 kHz without Noise Reduction Filter DC to 7.5 kHz with Noise Reduction Filter	
Modulation Coefficient (Constant Current Mode)	150 mA/V ± 5%	
Modulation Coefficient (Constant Power Mode) ^c	200 μA/V ± 5% (Low) 2 mA/V ± 5% (High)	

a. When the device is controlled via the front panel, the resolution is limited by the display. Higher resolution can be achieved by remotely controlling the device.

b. The user can toggle between low and high photocurrent ranges.

c. The power modulation is the product of the controller's photocurrent modulation and the laser diode's slope efficiency.

All technical data are valid at $23 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and $45 \pm 15\%$ relative humidity and subject to change without notice.

TEC Specifications

	Via Front Panel ^a	Via Remote Control ^a
TEC Current Output		
Control Range	-3.0 to +3.0 A	
Compliance Voltage	>4.7 V	
Maximum Output Power	>14.1 W	
Resolution	1 mA	100 μ A
Accuracy	$\pm(0.2\% + 20 \text{ mA})$	
TEC Current Limit		
Setting Range	5 mA to 3.0 A	
Resolution	1 mA	100 μ A
Accuracy	$\pm(0.2\% + 20 \text{ mA})$	
NTC Thermistor Sensors		
Resistance Measurement Range	300 Ω to 150 k Ω	
Control Range ^b	-55 $^{\circ}\text{C}$ to +150 $^{\circ}\text{C}$ (Max)	
Temperature Resolution	0.01 $^{\circ}\text{C}$	
Resistance Resolution	1 Ω	
Accuracy	$\pm(0.1\% + 1 \Omega)$	
Temperature Stability ^b (24 Hours)	<0.005 $^{\circ}\text{C}$ (Typical)	
Temperature Coefficient	<5 mK/ $^{\circ}\text{C}$	
Temperature Window Protection		
Setting Range	0.01 $^{\circ}\text{C}$ to 100.0 $^{\circ}\text{C}$	
Protection Reset Delay	0 to 600 s	

a. When the device is controlled via the front panel, the resolution is limited by the display. Higher resolution can be achieved by remotely controlling the device.

b. The temperature control range and thermal stability depend upon the physical parameters of the thermistor and the operating temperature, respectively.

All technical data are valid at $23 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and $45 \pm 15\%$ relative humidity and subject to change without notice.

General Specifications

Interface	
USB 2.0	Compliant with USBTMC/USBTMC USB488 Specification Rev. 1.0
Protocol	SCPI-Compliant Command Set
Supplied Drivers	VISA VXi pnp™, MS Visual Studio™, MS Visual Studio.net™, LabVIEW™, LabWindows/CVI™
General Data	
Safety Features	Interlock, Keylock Switch, Laser Current Limit, Soft Start, Short Circuit when Laser Off, Laser Overvoltage Protection, Over Temperature Protection, Temperature Window Protection
Display	4.3" LCD TFT, 480 x 272 Pixels
Socket for Laser, Photodiode, NTC, TEC	Compatible with Butterfly Type 1 (Pump) and Butterfly Type 2 (Telecom)
Connector for DC Power Input	2.0 mm Center Pin Connected to +
Connector for Modulation Input	SMA
Connector for Interlock & Laser On Signal	2.5 mm Mono Phono Jack
Connector for USB-Interface	USB Type Mini-B
Chassis Ground Connector	4 mm Banana Jack
Desktop Power Supply, Line Voltage, Line Frequency	AC: 100 to 240 V $\pm 10\%$, 47 to 63 Hz DC: 12 V $\pm 5\%$ / 3.5 A
Maximum Power Consumption	40 VA
Operating Temperature	0 to +40 $^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature	-40 to +70 $^{\circ}\text{C}$
Warm-up Time for Rated Accuracy	30 min
Weight (with Power Supply)	1.0 kg
Weight (without Power Supply)	0.75 kg
Dimensions without Operating Elements ^a (W x H x D)	111 mm x 73.5 mm x 153.3 mm (4.37" x 2.9" x 6.04")
Dimensions with Operating Elements ^a (W x H x D)	111 mm x 73.5 mm x 169.9 mm (4.37" x 2.9" x 6.69")

a. Dimensions do not include the mounting clips. With these clips attached, the unit is 165 mm wide.

ANEXO B Caracterización del Láser DFB

Tabla de comportamiento a 40mA		
Temperatura (°C)	Longitud de onda (nm)	Potencia (dBm)
15	1557,004	6,15
15,5	1557,09	6,15
16	1557,176	6,13
16,5	1557,26	6,1
17	1557,346	6,1
17,5	1557,432	6,1
18	1557,516	6,07
18,5	1557,604	6,05
19	1557,69	6,04
19,5	1557,776	6
20	1557,864	5,97
20,5	1557,948	5,94
21	1558,034	5,9
21,5	1558,122	5,87
22	1558,208	5,85
22,5	1558,296	5,8
23	1558,391	5,01
23,5	1558,477	4,95
24	1558,565	4,92
24,5	1558,652	4,89
25	1558,742	4,83
25,5	1558,828	4,77
26	1558,916	4,72
26,5	1559,004	4,66
27	1559,092	4,6
27,5	1559,18	4,55
28	1559,269	4,48
28,5	1559,36	4,39
29	1559,443	4,36
29,5	1559,536	4,29
30	1559,626	4,15
30,5	1559,716	4,06
31	1559,806	3,98
31,5	1559,896	3,88
32	1559,986	3,79
32,5	1560,076	3,66
33	1560,182	3,86
33,5	1560,276	3,7
34	1560,366	3,57
34,5	1560,458	3,46
35	1560,548	3,3

Tabla de comportamiento a 140mA		
Temperatura (°C)	Longitud de onda (nm)	Potencia (dBm)
15	1557,23	10,2
15,5	1557,316	10,2
16	1557,402	10,2
16,5	1557,488	10,18
17	1557,576	10,18
17,5	1557,662	10,18
18	1557,748	10,18
18,5	1557,834	10,18
19	1557,932	10,19
19,5	1558,018	10,19
20	1558,094	10,18
20,5	1558,182	10,17
21	1558,268	10,15
21,5	1558,356	10,14
22	1558,444	10,17
22,5	1558,532	10,14
23	1558,618	10,14
23,5	1558,706	10,14
24	1558,796	10,11
24,5	1558,884	10,09
25	1558,974	10,09
25,5	1559,062	10,06
26	1559,152	10,01
26,5	1559,24	10,04
27	1559,33	10,01
27,5	1559,42	9,99
28	1559,51	9,96
28,5	1559,6	9,93
29	1559,694	9,91
29,5	1559,786	9,91
30	1559,876	9,88
30,5	1559,968	9,84
31	1560,058	9,82
31,5	1560,148	9,79
32	1560,24	9,77
32,5	1560,33	9,75
33	1560,422	9,69
33,5	1560,514	9,66
34	1560,606	9,62
34,5	1560,696	9,59
35	1560,79	9,55

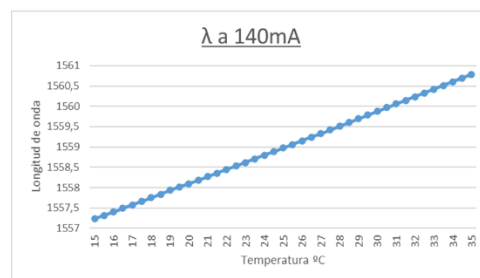
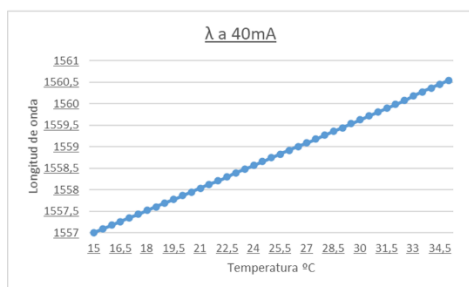
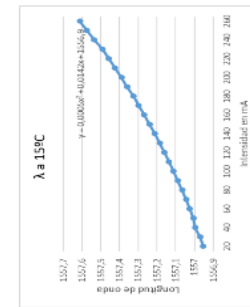
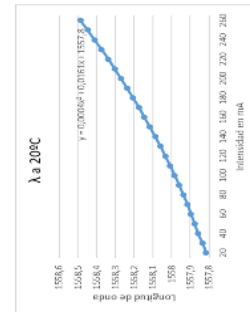
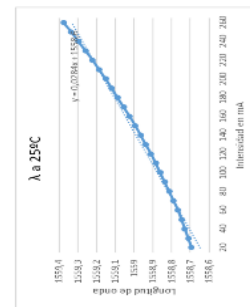
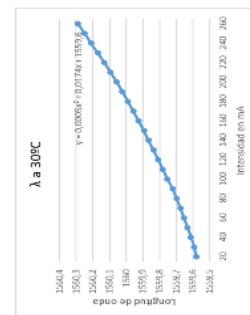
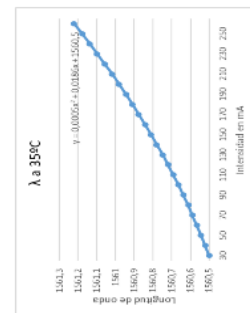


Tabla de comportamiento a 35°C				Tabla de comportamiento a 30°C				Tabla de comportamiento a 25°C				Tabla de comportamiento a 20°C				Tabla de comportamiento a 15°C			
Intensidad (mA)	Longitud de onda (nm)	Potencia (dBm)		Intensidad (mA)	Longitud de onda (nm)	Potencia (dBm)		Intensidad (mA)	Longitud de onda (nm)	Potencia (dBm)		Intensidad (mA)	Longitud de onda (nm)	Potencia (dBm)		Intensidad (mA)	Longitud de onda (nm)	Potencia (dBm)	
0	10			0	10			0	10			0	10			0	10		
20	1560,564	-48,7		20	1560,58	-30,95		20	1558,86	-5,77		20	1557,816	-4,19		20	1556,934	-3,15	
30	1560,5	-3,25		30	1559,582	-40,95		30	1558,71	0,25		30	1557,834	0,86		30	1556,937	1,43	
40	1560,522	1,07		40	1559,612	2,17		40	1558,73	2,86		40	1557,86	3,16		40	1556,988	3,29	
50	1560,544	3,22		50	1559,632	4		50	1558,746	4,47		50	1557,876	4,09		50	1557,006	4,7	
60	1560,566	4,66		60	1559,654	5,29		60	1558,766	5,65		60	1557,898	5,8		60	1557,036	5,79	
70	1560,59	5,77		70	1559,674	6,28		70	1558,79	6,57		70	1557,916	6,71		70	1557,046	6,66	
80	1560,612	6,62		80	1559,698	7,1		80	1558,812	7,36		80	1557,958	7,46		80	1557,066	7,37	
90	1560,638	7,36		90	1559,722	7,8		90	1558,836	8,01		90	1557,96	8,09		90	1557,09	7,99	
100	1560,664	7,96		100	1559,754	8,39		100	1558,86	8,58		100	1557,984	8,64		100	1557,112	8,5	
110	1560,692	8,5		110	1559,78	8,9		110	1558,884	9,1		110	1558,008	9,13		110	1557,136	8,99	
120	1560,72	8,99		120	1559,808	9,36		120	1558,91	9,53		120	1558,034	9,58		120	1557,16	9,43	
130	1560,748	9,44		130	1559,836	9,78		130	1558,938	9,94		130	1558,06	9,98		130	1557,186	9,8	
140	1560,78	9,82		140	1559,866	10,15		140	1558,966	10,32		140	1558,088	10,34		140	1557,212	10,17	
150	1560,81	10,2		150	1559,894	10,46		150	1558,994	10,65		150	1558,116	10,68		150	1557,24	10,5	
160	1560,842	10,52		160	1559,926	10,83		160	1559,014	10,96		160	1558,146	10,97		160	1557,268	10,8	
170	1560,876	10,82		170	1559,958	11,12		170	1559,056	11,25		170	1558,174	11,27		170	1557,298	11,09	
180	1560,91	11,1		180	1559,99	11,4		180	1559,088	11,54		180	1558,206	11,55		180	1557,326	11,35	
190	1560,944	11,35		190	1560,024	11,66		190	1559,12	11,78		190	1558,238	11,78		190	1557,36	11,6	
200	1560,982	11,61		200	1560,058	11,91		200	1559,152	12,04		200	1558,27	12,04		200	1557,39	11,85	
210	1561,018	11,86		210	1560,094	12,13		210	1559,188	12,28		210	1558,304	12,27		210	1557,424	12,05	
220	1561,058	12,09		220	1560,132	12,34		220	1559,222	12,48		220	1558,338	12,48		220	1557,458	12,26	
230	1561,098	12,29		230	1560,17	12,55		230	1559,26	12,7		230	1558,374	12,7		230	1557,49	12,47	
240	1561,138	12,49		240	1560,21	12,76		240	1559,298	12,88		240	1558,412	12,89		240	1557,536	12,67	
250	1561,178	12,69		250	1560,25	12,96		250	1559,336	13,07		250	1558,448	13,07		250	1557,574	12,86	
260	1561,222	12,87		260	1560,29	13,13		260	1559,376	13,26		260	1558,486	13,24		260	1557,612	13,04	



ANEXO C Especificaciones del dispositivo multifunción Analog Discovery 2

Analog Inputs

- Channels: 2
- Channel type: differential
- Resolution: 14-bit
- Absolute Resolution (scale $\leq 0.5V/div$): 0.32mV
- Absolute Resolution (scale $\geq 1V/div$): 3.58mV
- Accuracy (scale $\leq 0.5V/div$, $V_{inCM} = 0V$): $\pm 10mV \pm 0.5\%$
- Accuracy (scale $\geq 1V/div$, $V_{inCM} = 0V$): $\pm 100mV \pm 0.5\%$
- CMMR (typical): $\pm 0.5\%$
- Sample rate (real time): 100 $\frac{MS}{s}$
- Input impedance: $1M\Omega || 24pF$
- Scope scales: 500uV to 5V/div
- Analog bandwidth with Discovery BNC adapter: 30+ $\frac{MHz}{s}$ @ 3dB, 10 $\frac{MHz}{s}$ @ 0.5dB, 5 $\frac{MHz}{s}$ @ 0.1dB
- Analog bandwidth with included flywires: 9 $\frac{MHz}{s}$ @ 3dB, 2.9 $\frac{MHz}{s}$ @ 0.5dB, 0.8 $\frac{MHz}{s}$ @ 0.1dB
- Input range: $\pm 25V$ ($\pm 50V$ diff)
- Input protected to: $\pm 50V$
- Buffer size/channel: Up to 16k samples
- Triggering: edge, pulse, transition, hysteresis, etc.
- Cross-triggering with Logic Analyzer, Waveform Generator, Pattern Generator, or external trigger
- Sampling modes: average, decimate, min/max
- Mixed signal visualization (analog and digital signals share same view pane)
- Real-time views: FFTs, XY plots, histograms, and other
- Multiple math channels with complex functions
- Cursors with advanced data measurements
- Captured data files can be exported in standard formats
- Scope configurations can be saved, exported, and imported

Arbitrary Waveform Generator

- Channels: 2
- Channel type: single ended
- Resolution: 14-bit
- Absolute Resolution (amplitude $\leq 1V$): 166 μV
- Absolute Resolution (amplitude $> 1V$): 665 μV
- Accuracy - typical ($|V_{out}| \leq 1V$): $\pm 10mV \pm 0.5\%$
- Accuracy - typical ($|V_{out}| > 1V$): $\pm 25mV \pm 0.5\%$
- Sample rate (real time): 100 $\frac{MS}{s}$
- AC amplitude (max): $\pm 5V$
- DC Offset (max): $\pm 5V$
- Analog bandwidth with Discovery BNC adapter: 12 $\frac{MHz}{s}$ @ 3dB, 4 $\frac{MHz}{s}$ @ 0.5dB, 1 $\frac{MHz}{s}$ @ 0.1dB
- Analog bandwidth with included flywires: 9 $\frac{MHz}{s}$ @ 3dB, 2.9 $\frac{MHz}{s}$ @ 0.5dB, 0.8 $\frac{MHz}{s}$ @ 0.1dB
- Slew rate (10V step): 400V/ μs
- Buffer size/channel: up to 16k samples
- Standard waveforms: sine, triangle, sawtooth, etc.
- Advanced waveforms: Sweeps, AM, FM.
- User-defined arbitrary waveforms: defined within WaveForms software user interface or using standard tools (e.g. Excel)

Logic Analyzer

- Channels: 16 (shared)
- Sample rate (real time): 100 $\frac{MS}{s}$
- Buffer size/channel: up to 16K samples
- Input logic: LVCMOS (1.8V/3.3V, 5V tolerant)
- Multiple trigger options including pin change, bus pattern, etc.
- Cross-triggering between Analog input channels, Logic Analyzer, Pattern Generator, or external trigger
- Interpreter for SPI, I2C, UART, Parallel bus
- Data file import/export using standard formats

Digital Pattern Generator

- Channels: 16 (shared)
- Sample rate (real time): 100 MS/s
- Algorithmic pattern generator (no buffers used)
- Custom pattern buffer/channel: up to 16K samples
- Output logic standard: LVCMOS (3.3V, 12mA)
- Data file import/export using standard formats
- Customized visualization for signals and buses

Digital I/O

- Channels: 16 (shared)
- Input logic: LVCMOS (1.8V/3.3V, 5V tolerant)
- Output logic standard: LVCMOS (3.3V, 12mA)
- Virtual I/O devices (buttons, switches & displays)
- Customized visualization options available

Power Supplies

- Voltage range: 0.5V...5V and -0.5V...-5V
- Pmax (USB powered): 500mW total
- Imax (USB powered): 700mA for each supply
- Pmax (AUX powered): 2.1W for each supply
- Imax (AUX powered): 700mA for each supply
- Accuracy (no load): $\pm 10\text{mV}$
- Output impedance: $50\text{m}\Omega$ (typical)

Network Analyzer

- Shared instruments: Scope, AWG
- Frequency sweep range: 1Hz to 10MHz
- Frequency steps: 5 ... 1000
- Settable input amplitude and offset
- Analog input records response at each frequency
- Available diagrams: Bode, Nichols, or Nyquist

Voltmeters

- Channels (shared with scope): 2
- Channel type: differential
- Measurements: DC, AC, True RMS
- Resolution: 14-bit
- Accuracy (scale $\leq 0.5V/div$): $\pm 5mV$
- Accuracy (scale $\geq 1V/div$): $\pm 50mV$
- Input impedance: $1M\Omega \parallel 24pF$
- Input range: $\pm 25V$ ($\pm 50V$ div)
- Input protected to: $\pm 50V$

Spectrum Analyzer

- Channels (shared with scope): 2
- Power spectrum algorithms: FFT, CZT
- Frequency range modes: center/span, start/stop
- Frequency scales: linear, logarithmic
- Vertical axis options: voltage-peak, voltage-RMS, dBV, and dBu
- Windowing: options: rectangular, triangular, hamming, Cosine, and many others
- Cursors and automatic measurements: noise floor, SFDR, SNR, THD and many others
- Data file import/export using standard formats

ANEXO D Códigos completos

Funciones generales:

```
def conectarAD2():

    global dwf
    global hdwf
    global channel1
    global channel2

    if sys.platform.startswith("win"):
        dwf = cdll.dwf
    elif sys.platform.startswith("darwin"):
        dwf = cdll.LoadLibrary("/Library/Frameworks/dwf.framework/dwf")
    else:
        dwf = cdll.LoadLibrary("libdwf.so")

    hdwf = c_int()
    channel1 = c_int(0)
    channel2 = c_int(1)

    #Imprimo la version DWF usada
    version = create_string_buffer(16)
    dwf.FDwfGetVersion(version)
    print("DWF Version: "+str(version.value))

    #Al cerrar, el dispositivo continua funcionando
    dwf.FDwfParamSet(DwfParamOnClose, c_int(0)) # 0 = run, 1 = stop, 2 = shutdown

    #open device
    print("Opening first device...")
    dwf.FDwfDeviceOpen(c_int(-1), byref(hdwf))

    if hdwf.value == hdwfNone.value:
        print("failed to open device")
        quit()
    else: print("Connected")

    return dwf

def conectarLaser(I):
    #Conectamos a la montura del laser y la configuramos
    rm = visa.ResourceManager()
    print(rm.list_resources())
    tl=rm.open_resource('USB0::0x1313::0x804F::M00333887::0::INSTR')
    print(tl.query('*IDN?'))
    tl.write('SYST:BEEP:IMM')
    tl.timeout=5000
    #Fijamos la corriente del LD en amperios
    tl.write('SOUR:CURRE:LEV:AMPL ' +str(I))
    #Enciende el TEC
    tl.write('OUTP2:STAT 1')
    time.sleep(1)
    #Enciende el laser
    tl.write('OUTP:STAT 1')
    #Activar modulacion directa en el laser
    tl.write("SOUR:AM:STAT 1")
```

```

def tempLaser(T):
    tl.write('SOUR2:TEMP:SPO ' +str(T))
    tec=float(tl.query('SENS2:TEMP:DATA?'))
    while (tec>(T+0.01) or tec<(T-0.01)):
        tec=float(tl.query('SENS2:TEMP:DATA?'))
        print(tec)
        time.sleep(0.01)
    time.sleep(1)

def triggerDigital(freq,duty):

    #Creo un pulso de reloj a 1khz para tenerlo de trigger
    iChannel = 0
    hzFreq = freq # PWM freq Hz
    prcDuty = duty # duty %

    hzSys = c_double()
    maxDiv = c_uint()
    dwf.FDwfDigitalOutInternalClockInfo(hdwf, byref(hzSys))
    dwf.FDwfDigitalOutCounterInfo(hdwf, c_int(0), 0, byref(maxDiv))

    # for low frequencies use divider as pre-scaler to satisfy counter limitation of 32k
    cDiv = int(math.ceil(hzSys.value/hzFreq/maxDiv.value))
    # count steps to generate the give frequency
    cPulse = int(round(hzSys.value/hzFreq/cDiv))
    # duty
    cHigh = int(cPulse*prcDuty/100)
    cLow = int(cPulse-cHigh)

    print("Generate: "+str(hzSys.value/cPulse/cDiv)+"Hz duty: "+str(100.0*cHigh/cPulse)+"% divider: "+str(cDiv))

    dwf.FDwfDigitalOutEnableSet(hdwf, c_int(iChannel), c_int(1))
    dwf.FDwfDigitalOutTypeSet(hdwf, c_int(iChannel), c_int(0)) # DwfDigitalOutTypePulse
    dwf.FDwfDigitalOutDividerSet(hdwf, c_int(iChannel), c_int(cDiv)) # max 2147483649, for counter limitation or custom sample rate
    dwf.FDwfDigitalOutCounterSet(hdwf, c_int(iChannel), c_int(cLow), c_int(cHigh)) # max 32768
    dwf.FDwfDigitalOutConfigure(hdwf, c_int(1))

def configurarGen(channel,function,freq,amp,sym,phase):

    dwf.FDwfAnalogOutNodeEnableSet(hdwf, c_int(channel), AnalogOutNodeCarrier, c_bool(True))
    dwf.FDwfAnalogOutNodeFunctionSet(hdwf, c_int(channel), AnalogOutNodeCarrier, c_int(function))
    dwf.FDwfAnalogOutNodeFrequencySet(hdwf, c_int(channel), AnalogOutNodeCarrier, c_int(freq))
    dwf.FDwfAnalogOutNodeAmplitudeSet(hdwf, c_int(channel), AnalogOutNodeCarrier, c_double(amp))
    dwf.FDwfAnalogOutNodeSymmetrySet(hdwf, c_int(channel), AnalogOutNodeCarrier, c_double(sym))
    dwf.FDwfAnalogOutNodePhaseSet(hdwf, c_int(channel), AnalogOutNodeCarrier, c_double(phase))
    dwf.FDwfAnalogOutRepeatSet(hdwf, c_int(channel), c_int(1))
    if channel==0:
        dwf.FDwfAnalogOutTriggerSourceSet(hdwf, c_int(channel), trigsrctDetectorAnalogIn)

def configurarGenCustom(channel,freq,amp,phase,rgdSamples):
    dwf.FDwfAnalogOutNodeEnableSet(hdwf, c_int(channel), AnalogOutNodeCarrier, c_bool(True))
    dwf.FDwfAnalogOutNodeFunctionSet(hdwf, c_int(channel), AnalogOutNodeCarrier, c_int(7))
    dwf.FDwfAnalogOutNodeDataSet(hdwf, channel2, AnalogOutNodeCarrier, rgdSamples, c_int(cSamples))
    dwf.FDwfAnalogOutNodeFrequencySet(hdwf, c_int(channel), AnalogOutNodeCarrier, c_int(freq))
    dwf.FDwfAnalogOutNodeAmplitudeSet(hdwf, c_int(channel), AnalogOutNodeCarrier, c_double(amp))
    dwf.FDwfAnalogOutNodePhaseSet(hdwf, c_int(channel), AnalogOutNodeCarrier, c_double(phase))
    dwf.FDwfAnalogOutRepeatSet(hdwf, c_int(channel), c_int(1))
    if channel==0:
        dwf.FDwfAnalogOutTriggerSourceSet(hdwf, c_int(channel), trigsrctDetectorAnalogIn)

```



```
def activarGen(channel):  
    print("Generating wave...")  
    dwf.FDwfAnalogOutConfigure(hdwf, c_int(channel), c_bool(True))  
  
def configurarOsc(freq):  
    #Configuro el Osciloscopio  
    fset = freq*8192  
    c_fset = c_double(fset*2)  
    sts = c_byte()  
    rgdSamplesosc = (c_double*8192)()  
    rgdSamplesBis = (c_double*8192)()  
  
    #set up acquisition  
    dwf.FDwfAnalogInFrequencySet(hdwf, c_fset)  
    dwf.FDwfAnalogInBufferSizeSet(hdwf, c_int(8192))  
    dwf.FDwfAnalogInChannelEnableSet(hdwf, c_int(0), c_bool(True))  
    dwf.FDwfAnalogInChannelRangeSet(hdwf, c_int(0), c_double(1))  
  
    #set up trigger  
    dwf.FDwfAnalogInTriggerAutoTimeoutSet(hdwf, c_double(0)) #disable auto trigger  
    dwf.FDwfAnalogInTriggerSourceSet(hdwf, trigsrceExternal1) #one of the analog in channels  
    dwf.FDwfAnalogInTriggerTypeSet(hdwf, trigtypeEdge)  
    dwf.FDwfAnalogInTriggerChannelSet(hdwf, c_int(1)) # first channel  
    dwf.FDwfAnalogInTriggerLevelSet(hdwf, c_double(0.3)) # 0.5V  
    dwf.FDwfAnalogInTriggerConditionSet(hdwf, DwfTriggerSlopeRise)  
    dwf.FDwfAnalogInTriggerPositionSet(hdwf, c_double(0))  
  
    # wait at least 2 seconds with Analog Discovery for the offset to stabilize,  
    #before the first reading after device open or offset/range change  
    time.sleep(2)
```

```

def osciloscopioTrigger(freq):

    fset = freq*8192
    c_fset = c_double(fset)
    c_freq = c_double(freq)
    sts = c_byte()
    rgdSamples = (c_double*8192)()

    #Bloque del osciloscopio
    dwf.FDwfAnalogInAcquisitionModeSet(hdwf, acqmodeSingle)
    #Elijo la frecuencia de muestreo
    dwf.FDwfAnalogInFrequencySet(hdwf, c_fset)
    #Ajusta el tamaño del buffer
    dwf.FDwfAnalogInBufferSizeSet(hdwf, c_int(8192))
    #Activo el canal
    dwf.FDwfAnalogInChannelEnableSet(hdwf, c_int(0), c_bool(True))
    #Configuro el rango del canal en V
    dwf.FDwfAnalogInChannelRangeSet(hdwf, c_int(0), c_double(5))

    #set up trigger
    dwf.FDwfAnalogInTriggerAutoTimeoutSet(hdwf, c_double(0)) #disable auto trigger
    dwf.FDwfAnalogInTriggerSourceSet(hdwf, trigsrcDetectorAnalogIn) #one of the analog in channels
    dwf.FDwfAnalogInTriggerTypeSet(hdwf, trigtypeEdge)
    dwf.FDwfAnalogInTriggerChannelSet(hdwf, c_int(1))
    dwf.FDwfAnalogInTriggerLevelSet(hdwf, c_double(0.4)) # 1.5V
    dwf.FDwfAnalogInTriggerConditionSet(hdwf, trigcondRisingPositive)

    #Activa el osciloscopio
    print("Starting oscilloscope")
    dwf.FDwfAnalogInConfigure(hdwf, c_bool(False), c_bool(True))

    #Leo la informacion del osciloscopio
    while True:
        dwf.FDwfAnalogInStatus(hdwf, c_int(1), byref(sts))
        if sts.value == DwfStateDone.value :
            break
    print("Acquisition done")

    #Todos los datos adquiridos son copiados a rgdSamples y cierro todos los dispositivos activos
    dwf.FDwfAnalogInStatusData(hdwf, c_int(0), rgdSamples, 8192) # get channel 1 data

    #Calculo el valor DC
    dc = sum(rgdSamples)/len(rgdSamples)
    print("DC: "+str(dc)+"V")

def capturar():
    samples=[]
    while True:
        dwf.FDwfAnalogInStatus(hdwf, c_int(1), byref(sts))
        if sts.value == DwfStateDone.value :
            break
        time.sleep(0.001)

    dwf.FDwfAnalogInStatusData(hdwf, c_int(0), rgdSamplesOsc, 8192) # get channel 1 data

    for j in range(0,len(rgdSamplesOsc)):
        samples.append(rgdSamplesOsc[j])

def crearCarpeta():
    #Creo una carpeta para meter los archivos leidos
    now = datetime.datetime.now()
    dateandtime = str(now.year) + str(now.month) + str(now.day)+"H"+str(now.hour)+str(now.minute)+str(now.second)
    pathname= "BarridoCTL "+str(dateandtime)
    pathlib.Path(pathname).mkdir(parents=True, exist_ok=True)

```

```
def crearGraficos():
    win = pg.GraphicsWindow(title="Sample process")
    win.resize(1000,600)
    win.setWindowTitle('Reconstrucción')

    winSamples = pg.GraphicsWindow(title="Sample process")
    winSamples.resize(1000,600)
    winSamples.setWindowTitle('RgdSamples')

    pw1 = win.addPlot()
    pw1.setYRange(0,0.5,padding=0)
    pw1.setXRange(0,ciclos,padding=0)

    pw2 = win.addPlot()
    pw2.setYRange(0,0.5,padding=0)
    pw2.setXRange(0,ciclos,padding=0)

    pw3 = win.addPlot()
    pw3.setYRange(0,0.5,padding=0)
    pw3.setXRange(0,ciclos,padding=0)

    pw4 = win.addPlot()
    pw4.setYRange(0,0.5,padding=0)
    pw4.setXRange(0,ciclos,padding=0)

    pwSamples = winSamples.addPlot()
    pwSamples.setYRange(0,0.5,padding=0)
    pwSamples.setXRange(4000,8192,padding=0)

def graficar(samples,rgdSamplesOsc):

    rgdSamples1 = rgdSamplesOsc[5887:5887+muestras]
    rgdSamples2 = rgdSamplesOsc[5718:5725+muestras]
    rgdSamples3 = rgdSamplesOsc[6587:6587+muestras]
    rgdSamples4 = rgdSamplesOsc[7460:7460+muestras]

    media1 = np.sum(rgdSamples1)/len(rgdSamples1)
    media2 = np.sum(rgdSamples2)/len(rgdSamples2)
    media3 = np.sum(rgdSamples3)/len(rgdSamples3)
    media4 = np.sum(rgdSamples4)/len(rgdSamples4)

    DC1.append(media1)
    DC2.append(media2)
    DC3.append(media3)
    DC4.append(media4)

    pw1.plot(DC1,clear=True)
    pw2.plot(DC2,clear=True)
    pw3.plot(DC3,clear=True)
    pw4.plot(DC4,clear=True)
    pwSamples.plot(samples,clear=True)
    pg.QtGui.QApplication.processEvents()
```

```
def tempD(x,valores,temperaturas):
    #0=pico,1=valle
    if x==0:
        maximo=max(valores)
        i=valores.index(maximo)

    if x==1:
        minimo=min(valores)
        i=valores.index(minimo)

    tempD=temperaturas[i]

    return tempD

def desconexiones():

    tl.write('SOUR:AM:STAT 0')
    #Apaga el laser
    tl.write('OUTP:STAT 0')
    time.sleep(1)
    #Apaga el TEC
    tl.write('OUTP2:STAT 0')
    print(tl.query('SYST:ERR:NEXT?'))
    tl.write('SYST:BEEP:IMM')

    dwf.FDwfDeviceClose(hdwf)
```

Corrector:

```
from ctypes import *
import time
from dwfconstants import *
import sys
import matplotlib.pyplot as plt
import math
import numpy
from funciones import *
import visa

#Conectamos el Analog Discovery 2
conectar()

plt.cla()

#Vemos que dispositivos VISA tenemos en el PC y nos conectamos a la montura THORLABS
rm = visa.ResourceManager()
print(rm.list_resources())

tl=rm.open_resource('USB0::0x1313::0x804F::M00333887::0::INSTR')
print(tl.query('*IDN?'))
tl.write('SYST:BEEP:IMM')
tl.timeout=5000

#Fijamos la corriente del LD en amperios
a=0.14
tl.write('SOUR:CURR:LEV:AMPL ' +str(a))

#Enciende el TEC
tl.write('OUTP2:STAT 1')

time.sleep(2)
#Enciende el laser
tl.write('OUTP:STAT 1')

#Encender generador de funciones
generador(100,0.8,0)

#Activar modulacion en laser
tl.write("SOUR:AM:STAT 1")
```

```

#Comenzamos el bucle con el minimo de temperatura
t=15.0
while t<=35.0:
    #Indicamos al TEC la temperatura
    t1.write('SOUR2:TEMP:SPO ' +str(t))
    tec=float(t1.query('SENS2:TEMP:DATA?'))
    print(tec)
    #Creamos un archivo de txt
    f=open('corrector_140mA_'+str(t)+'uuc_triangle.txt','w')

    #Cuando llega a la temperatura deseada esperamos a que se estabilice y activamos el osciloscopio
    if tec<(t+0.01) and tec>(t-0.01):
        time.sleep(2)

        dc,rgdSamples=osciloscopioTrigger(200)

        f.write(str(rgdSamples[:]))
        plt.plot(rgdSamples[:],'.-')

        t+=0.5

    f.close

#-----

t1.write('SOUR2:TEMP:SPO ' +str(25))

#Desactivar modulacion en laser
t1.write('SOUR:AM:STAT 0')

#Apaga el laser
t1.write('OUTP:STAT 0')

time.sleep(1)
#Apaga el TEC
t1.write('OUTP2:STAT 0')

print(t1.query('SYST:ERR:NEXT?'))

desconectar()

t1.write('SYST:BEEP:IMM')

```

Interrogador básico:

```
from ctypes import *
import time
from dwfconstants import *
import sys
import matplotlib.pyplot as plt
import math
import numpy as np
from Funciones Software import *
import visa
from pyqtgraph.Qt import QtGui, QtCore
import pyqtgraph as pg

#Declaramos las variables de funcionamiento
freq=1000
I=0.14
Tmin=15
Tmax=35
Tsalto=0.5

#Conectamos el Analog Discovery 2
conectarAD2()

#Conectamos la montura laser y ponemos la intensidad deseada
conectarLaser(I)

#Creamos un archivo de txt
f=open('datos.txt','w')

#Creamos lista para guardar los valores DC que representaremos luego
valores=[]
temperaturas=[]
lambdas=[]

# Titulo y tamaño de la ventana
win = pg.GraphicsWindow(title="Sample process")
win.resize(1000,600)
win.setWindowTitle('Valores DC')

pw = win.addPlot()
```

```

#Comenzamos el bucle con el minimo de temperatura
T=Tmin
while True:
    #Indicamos al TEC la temperatura
    tempLaser(T)

    #Cuando llega a la temperatura deseada esperamos
    #a que se estabilice y activamos el osciloscopio
    if tec<(T+0.1) and tec>(T-0.1):
        time.sleep(1)
        dc,rgdSamples=osciloscopio(2*freq)
        l=tec*0.1779+1554.54038

        #Guardamos los datos en un archivo de texto
        f.write(str(T)+" "+str(dc)+" "+str(l)+"\n")

        valores.append(dc)
        temperaturas.append(t)
        lambdas.append(l)

        T+=Tsalto
    #Representamos los resultados obtenidos
    pw.plot(lambdas, valores, clear=True)
    pg.QtGui.QApplication.processEvents()
    #Cerramos el bucle cuando se sobrepasa la temperatura máxima
    if T>Tmax:
        break

f.close()

#Buscamos el valor máximo encontrado en el bucle anterior
#y la temperatura a la que estaba para volver ahí
tempD(0)
t1.write('SOUR2:TEMP:SPO ' +str(tempD))

#Abrimos el txt de la temperatura mas cercana
#a la tempMax y le sacamos los valores
tempAprox = round(tempD * 2) / 2
f=open("corrector_140mA_"+str(tempAprox)+"°C_sine.txt","r")
lectura = f.read()
lectura2=lectura.replace("[",",")
lectura3=lectura2.replace("]",",")
lectura4=lectura3.split(", ")
corrector = [float(i) for i in lectura4]

# Titulo y tamaño de la ventana
win2 = pg.GraphicsWindow(title="Sample process")
win2.resize(1000,600)
win2.setWindowTitle('Espectro')

pw = win2.addPlot()
pw.setYRange(-80,0,padding=0)

#Encender generador de funciones
generador(freq,0.8,0)
#Realizamos la primer medida del osciloscopio
dc,rgdSamples=osciloscopioTrigger(2*freq)

```



```

try:
    while True:
        #Volvemos a la temperatura en la que estaba el valor máximo
        tec=float(tl.query('SENS2:TEMP:DATA?'))
        print(tec)

        if tec<(tempD+0.1) and tec>(tempD-0.1):
            rgdSamples = actualizar(2*freq)
            #Creamos el eje x de lambdas
            #deltaLambda=tempMax*0.0034+0.6032
            minimo=tempD*0.177712+1554.2788
            maximo=tempD*0.18048+1554.8852
            delta=(maximo-minimo)/8192
            ejeLineal=[]
            for i in range(len(corrector)):
                ejeLineal.append(minimo+delta*i)

            #Creamos listas para guardar los datos
            corregido=[]
            correctordB=[]
            norm=[]
            rgdSamplesdB=[]
            for i in range(len(rgdSamples)):
                rgdSamplesdB.append(10*np.log(rgdSamples[i]))
                correctordB.append(10*np.log(corrector[i]))

            minC=min(correctordB)
            maxC=max(correctordB)
            #Corregimos los datos
            for i in range(len(correctordB)):
                z = 10*(correctordB[i]-minC)/(maxC-minC)
                norm.append(z)
                corregido.append(rgdSamplesdB[i]-norm[i])
            #Representamos la señal corregida
            pw.plot(ejeLineal[:], corregido[:], clear=True)
            pg.QtGui.QApplication.processEvents()

#Finalizamos el programa desde el teclado
except KeyboardInterrupt:

    desconexiones()

```

Interrogador TDM/WDM:

```
from ctypes import *
import time
import datetime
import pathlib
from dwfconstants import *
import sys
import matplotlib.pyplot as plt
import math
import numpy as np
from scipy import signal
import visa
from pyqtgraph.Qt import QtGui, QtCore
import pyqtgraph as pg
from Funciones Software import *

##Variables de funcionamiento
freq=1000 #en hercios
ampl=0.8 #en voltios
amp2=5 #en voltios
cSamples = 8192
ciclos = 500 #numero de muestras del barrido
a=0.16 #corriente media del laser en amperios
fase=0 #fase en grados para cuadrar el osciloscopio
Tini=10
Tfin=35
Tsalto=1

crearCarpeta()

crearGraficos()

conectarLaser(a)

conectarAD2()

configurarGen(0,4,freq,ampl,100,fase)

muestras = math.trunc(8192/ciclos)
mod=[-amp2]*8192
```

```

for i in range(muestras):
    mod[i] = amp2

for i in range(len(rgdSamples)):
    rgdSamples[i] = mod[i];

configurarGenCustom(1,freq,amp2,fase-180,rgdSamples)

activarGen(0)

configurarOsc(freq)

while(Tini<Tfin):

    #Creamos un archivo de txt
    filename=pathname+"\Barrido_temp_"+str(Tini)+"ciclos"+str(ciclos)+"Claser"+str(a)+".csv"

    tempLaser(Tini)

    for i in range(ciclos+1):

        activarGen(1)

        capturar()

        with open(filename,"ab") as f:
            np.savetxt(f,samples[4000:cSamples],fmt='%.18f',delimiter=',',newline='\n' )

        graficar()

        #Una vez adquirida la primera traza, movemos el pulso una posicion
        mod=[-amp2]*8192
        for j in range(muestras):
            mod[j+muestras*i] = amp2

        for j in range(len(rgdSamples)):
            rgdSamples[j] = mod[j];

    Tini=Tini+salto

desconexiones()

```